

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

*« Se défier du ton d'assurance qu'il est si facile de prendre et si dangereux d'écouter »
Charles Coquebert, Journal des mines n°1, Vendémiaire An III (septembre 1794)*



Adaptation au changement climatique

UNE SÉRIE DES
ANNALES
DES MINES

FONDÉES EN 1794

*Publiées avec le soutien
de l'Institut MinesTélécom*

N°106
AVRIL 2022

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

UNE SÉRIE DES

ANNALES DES MINES

FONDÉES EN 1794

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

ISSN 1268-4783
Série trimestrielle - N°106 - Avril 2022

Rédaction

Conseil général de l'Économie (CGE)
Ministère de l'Économie, des Finances
et de la Relance
120, rue de Bercy
Télédoc 797
75572 Paris Cedex 12
Tél. : 01 53 18 52 68
<http://www.annales.org>

François Valérian
Rédacteur en chef

Gérard Comby
Secrétaire général

Alexia Kappelmann
Secrétaire générale adjointe

Magali Gimon
Assistante de rédaction / Maquettiste

Myriam Michaux
Webmestre / Maquettiste

Publication

Photo de couverture
Libre de droits. Photo téléchargée sur le site
de Pixabay (<https://pixabay.com/fr/photos/paysage-changement-climat-la-nature-4684217/>)

Iconographie
Gérard Comby

Mise en page
Magali Gimon

Impression
Dupliprint Mayenne

Membres du Comité de rédaction

Pierre Couveinhes
Président du Comité de rédaction

Paul-Henri Bourrelier

Dominique Dron

Jean-Luc Laurent

Richard Lavergne

Michel Pascal

Didier Pillet

Claire Tutenuit

François Valérian

Benjamin Vignard

La mention au regard de certaines illustrations du sigle
« D. R. » correspond à des documents ou photographies
pour lesquels nos recherches d'ayants droit ou d'héritiers
se sont avérées infructueuses.

Le contenu des articles n'engage que la seule responsabilité
de leurs auteurs.

Adaptation au changement climatique

04

Préface

Barbara POMPILI

06

Introduction

Hervé LE TREUT et Michel PASCAL

08

Préambule

Adaptation au changement climatique :
mieux définir les enjeux
pour engager le débat

Ronan DANTEC

Quel sera le climat en 2050 et ses conséquences ?

11

Les principaux enseignements
du 6^e rapport du groupe I du GIEC

David SALAS Y MÉLIA

17

Impacts du changement climatique
à l'échelle mondiale : principaux
enseignements du dernier rapport
du groupe de travail II du GIEC

Éric BRUN et Lisa BOSTVIRONNOIS

21

Panorama en Europe et en France
des effets présents et à venir
du changement climatique

Jérôme DUVERNOY

27

Quel climat en France en 2050 et 2100 ?

Virginie SCHWARZ

et Jean-Michel SOUBEYROUX

Les effets du réchauffement climatique sont déjà visibles

32

Repenser l'eau à l'ère
du changement climatique

Denis SALLES

37

Le changement climatique en montagne :
impacts, risques et adaptation

Samuel MORIN

42

Des impacts sanitaires du changement
climatique déjà bien visibles :
l'exemple des canicules

Lucie ADÉLAÏDE, Olivier CHANEL
et Mathilde PASCAL

48

Les effets du changement climatique :
quelle adaptation pour les territoires
littoraux ?

Patrick BAZIN

54

Résilience des systèmes électriques
face au changement climatique

Alain BURTIN et Sylvie PAREY

59

Le changement climatique
et ses conséquences économiques

Laurent MONTADOR

Adapter et atténuer : une approche inclusive systématique

66

Atténuation et adaptation :
une course de vitesse face au temps

Hervé LE TREUT

69

Les stratégies européenne et française
d'adaptation au changement climatique

Jérôme DUVERNOY, Marie CARREGA
et Sarah VOIRIN

72

Les liens entre adaptation et atténuation :
quand s'adapter aggrave
le changement climatique

Vincent VIGUIÉ

76

L'adaptation au changement climatique :
d'abord de l'intelligence
mise dans les projets

Morgane NICOL et Vivian DÉPOUES

81

Quelles perspectives pour l'eau
et l'agriculture d'ici à 2050 dans le contexte
du changement climatique ?

Hugues AYPHASSORHO, Michel SALLENAVE,
Nathalie BERTRAND, François MITTEAULT
et Dominique ROLLIN

85

Biodiversité et climat :
les approches fondées sur la nature

Denis COUVET et Hélène SOUBELET

89

Les extrêmes climatiques :
perceptions et enjeux sociaux et politiques

Solange MARTIN

96

Géopolitique de l'adaptation
au changement climatique :
la survie et la puissance des nations

Jean-Michel VALANTIN

Hors dossier

101

Le *Carbone Capture and Storage* (CCS) :
un véritable atout,
des arbitrages nécessaires

(article se rattachant au n°105 de
Responsabilité & Environnement, Janvier 2022,
« Captage, stockage et utilisation du carbone »)

Maxime EFOUI-HESS

106

Traduction des résumés

110

Biographies des auteurs

Ce numéro a été coordonné
par Hervé LE TREUT et Michel PASCAL

Préface

Par Barbara POMPILI

Ministre de la Transition écologique

Le changement climatique est sans doute le principal défi de ce siècle. Si rien n'est fait pour l'atténuer et s'y adapter, une dégradation sans précédent de nos conditions de vie à la surface de la planète nous attend : canicules à répétition, sécheresses, tempêtes, élévation du niveau de la mer, bouleversement des écosystèmes, et même, émergence de nouvelles maladies.

Il s'agit d'un problème mondial, aucun pays n'est épargné ; il n'y a pas de « planète B » sur laquelle se réfugier. C'est la Terre et son climat qui nous permettent de vivre comme nous le faisons. C'est cette mince couche autour de notre planète, que l'on appelle la biosphère, qui est le support, fragile et toujours en équilibre instable, de la vie sur Terre.

Nous sommes certains désormais de l'impact des activités humaines sur le climat. Les scientifiques appellent cela l'anthropocène : notre empreinte sur la planète est désormais assez lourde pour déstabiliser ses grands équilibres. C'est un problème qui transcende les générations. On sait que nos actes d'aujourd'hui n'auront pas de conséquences que pour nous, mais aussi pour les générations à venir. Jamais l'impact des actes d'une génération présente sur une génération à venir n'a été aussi fort.

Que voulons-nous ? Que nous puissions continuer à vivre dans le monde tel que nous le connaissons et auquel nous avons mis des millénaires à nous adapter. Que nous puissions continuer à améliorer nos conditions de vie, à aimer, à rire, à entretenir des relations avec les autres.

Nous n'avons pas le choix, nous devons préserver les équilibres de notre environnement si nous voulons que l'espèce humaine perpétue son existence sur cette Terre. Sans cet environnement, pas de développement économique, pas de santé, pas de richesse, pas de PIB, pas d'emploi. Pour nous, mais aussi et peut-être surtout pour nos enfants, nos petits-enfants.

Comment agir ?

Il faut d'abord réduire nos émissions de gaz à effet de serre au niveau de ce que notre environnement est prêt à absorber : c'est une tâche gigantesque qui attend les 195 pays parties à la Convention cadre des Nations unies sur le changement climatique. La décarbonation de notre économie implique non seulement de réorganiser complètement nos modes de production et de réinventer des procédés de fabrication sur lesquels notre économie est fondée depuis deux siècles, mais aussi de construire un nouveau modèle de développement, moins gourmand en énergie, en particulier s'agissant des transports, de notre urbanisme, de nos modes d'alimentation... Plus difficile encore, peut-être, il sera essentiel d'accompagner les femmes et les hommes dans ces changements, en particulier les plus fragiles.

Mais au-delà de la réduction nécessaire de nos émissions, il faut prendre acte de l'existence, d'ores et déjà, d'un changement climatique et donc s'y adapter.

Le changement climatique n'est pas un futur prospectif : c'est déjà notre réalité aujourd'hui. Des événements extrêmes qui se multiplient (inondations, feux de forêts, canicules), des glaciers qui reculent (la Mer de glace a perdu 100 m d'épaisseur dans sa partie basse en 300 ans). Nous voyons dans notre actualité immédiate les effets d'un phénomène qui s'accélère.

La température moyenne en France a d'ores et déjà augmenté de 1,5°C depuis le début de l'ère industrielle. Nous nous sommes d'ailleurs déjà adaptés à des étés plus caniculaires, à des hivers moins rudes, à des catastrophes naturelles chaque année plus nombreuses et plus intenses. Et ce n'est qu'un avant-goût de ce qui nous attend.

Je vois deux volets à cette adaptation.

Le premier, le plus facile à concevoir, c'est d'adapter nos infrastructures et nos modes de production au climat à venir : mise en place d'îlots de fraîcheur dans les villes, protection des logements contre la chaleur, adaptation de l'agriculture en ayant recours à des espèces végétales plus résilientes face à la sécheresse ou aux événements extrêmes, arrêt des constructions dans les zones côtières soumises à une potentielle submersion, adaptation de nos infrastructures énergétiques ou de transport aux fortes chaleurs. Les actions sont multiples et sont notamment inscrites dans le plan national d'adaptation au changement climatique. Cette adaptation de nos infrastructures a aussi été une des ambitions de la loi Climat et Résilience, notamment sur l'évolution du trait de côte.

Le deuxième volet, et peut-être le plus difficile, c'est l'adaptation de nos modes de vie à ces nouvelles conditions climatiques : faire évoluer notre alimentation, aménager les modes de travail lors des épisodes de forte chaleur, développer le tourisme durable. L'adaptation est aussi un défi individuel.

La puissance publique doit être motrice de ces mutations profondes qui conditionnent à terme nos conditions de vie quotidiennes. Nous devons anticiper les changements, à la fois en développant les outils de connaissance des risques associés à la transition écologique et en accélérant l'intégration des préoccupations de l'adaptation dans l'ensemble des stratégies des acteurs publics, notamment au niveau des collectivités territoriales. C'est ainsi que nous pourrions accompagner toutes les femmes et tous les hommes dans ce changement nécessaire.

C'est dans ce contexte que je salue la publication de ce numéro de *Responsabilité & Environnement* des *Annales des Mines* portant sur l'adaptation au changement climatique. Le positionnement des *Annales des Mines*, à l'intersection de ces deux démarches complémentaires que sont la connaissance scientifique et l'action publique, est particulièrement précieux pour traiter de l'adaptation. Je suis certaine que cette démarche ainsi que les très nombreux sujets abordés dans ce numéro contribueront à une meilleure prise en compte de l'adaptation à toutes les échelles.

Introduction

Par Hervé LE TREUT

IPSL

Et Michel PASCAL

Conseil général de l'économie

Ce numéro consacré à l'adaptation au changement climatique s'inscrit dans un contexte très favorable, quelques semaines à peine après la sortie du rapport du groupe 2 du GIEC, précisément intitulé « Impacts, adaptation et vulnérabilité ».

Il s'inscrit aussi dans un cadre plus large, marqué par une série de rapports dont beaucoup sont issus du GIEC, et ont systématiquement porté le message d'une évolution rapide et négative de notre environnement climatique. Les émissions de gaz à effet de serre n'ont pas cessé d'augmenter et créent désormais une situation partiellement irréversible.

Cette situation, aux conséquences multiples, a rendu nécessaire de considérer différemment la gestion et la protection de nos territoires, qui ont fortement évolué depuis le précédent dossier des *Annales des Mines* consacré à cette problématique, lequel date de 2004.

La compréhension de ces changements se décrit au travers d'une large variété de questionnements. Comment se dessine aujourd'hui le suivi d'un climat en pleine évolution, et dans quel contexte (lequel est souvent interdisciplinaire) ? Comment conduire de front des actions d'atténuation, c'est-à-dire de réduction des émissions de gaz à effet de serre, et les actions d'adaptation qui y sont associées, en France et dans le monde ? Comment en gérer les conséquences ? Quelles initiatives sont prises dans les territoires pour organiser cette adaptation et anticiper l'avenir ? C'est à toutes ces interrogations que s'attache à répondre ce numéro.

Nous remercions chaleureusement la vingtaine de rédacteurs qui ont bien voulu, à travers leurs articles, éclairer le lecteur sur de nombreux aspects liés à l'adaptation au réchauffement climatique.

La connaissance progresse très vite..., les changements aussi.

Le GIEC est aujourd'hui formel : c'est bien l'homme qui est désormais le premier responsable des émissions de gaz à effet de serre, des émissions en augmentation très forte et qui conduisent au réchauffement climatique que nous connaissons aujourd'hui. Le GIEC est tout aussi formel sur les conséquences, qui sont importantes, mais aussi très différenciées selon les paramètres ou les temporalités auxquels on s'intéresse. La gestion des territoires exige de disposer d'une connaissance à des petites échelles d'espace et de temps. Mais il est aussi impossible d'ignorer des processus qui engageront le futur pour des milliers d'années, et probablement plus.

Nous disposons aujourd'hui d'informations et d'instruments qui permettent de mieux appréhender la variété des phénomènes extrêmes liés au changement climatique, et leurs conséquences qui sont et seront différentes selon que l'on se situe en Europe, en Afrique, en Asie ou au pôle Nord. Ces situations témoignent de changements indéniables et importants. Elles rendent aussi de plus en plus difficile la différenciation des besoins d'atténuation – à l'origine des premières manifestations du changement climatique – des besoins d'adaptation – qui jouent un rôle croissant, même s'ils apparaissent encore trop souvent comme un peu secondaires.

La partie la plus septentrionale de l'hémisphère Nord a toujours servi de vigie, annonçant les changements les plus importants. Elle va connaître, selon toute probabilité, une élévation des températures de 4 à 6°C au cours des prochaines décennies, soit une augmentation deux fois supérieure à la moyenne mondiale. Ce sont des chiffres très inquiétants, dont l'importance a déjà été étudiée depuis longtemps. Ils témoignent aujourd'hui de situations qui ne sont plus directement gérables, parce qu'elles ne permettent pas de retour en arrière. La disparition progressive, pendant l'été, de la calotte glaciaire arctique supprime l'effet d'albédo, et conduit donc à une augmentation de l'absorption des rayons solaires et, concomitamment, au réchauffement. Elle se présente ainsi comme un phénomène cumulatif qui n'offre qu'une seule échappatoire : le recours à l'adaptation.

Ce recours comme unique solution se retrouve dans une multitude de cas. La fonte des sols gelés de Sibérie s'accompagnant de la possible libération d'importantes quantités de méthane, les déserts qui s'étendent, l'évolution climatique dans les régions du sud et du nord de la Méditerranée, les périodes de forte chaleur comme celles de 2003, l'attribution des événements extrêmes (cyclones, tempêtes, inondations) aux actions humaines..., tous constituent autant d'événements extrêmes qui s'accroissent du fait du réchauffement climatique. Alors que ces phénomènes sont par nature assez imprévisibles pris isolément, le GIEC et les différents laboratoires qui scrutent les évolutions en cours ont pu

montrer qu'il existe effectivement une croissance généralisée de ces phénomènes ayant des conséquences humaines et financières majeures – et appellent là aussi à une gestion nouvelle de ces problématiques.

La première partie de ce numéro de *Responsabilité & Environnement* est ainsi consacrée à cette mise au point des connaissances, qui demande de développer des outils pour prévoir, pour anticiper.

Les investissements publics comme privés doivent aujourd'hui prendre en compte la situation qui existera dans un horizon humain de vingt à trente ans. Et cela est un fait nouveau. L'exemple le plus simple est l'opportunité de l'investissement dans une station de ski. La question de l'enneigement n'est aujourd'hui pas encore partout cruciale, mais elle se posera partout dans vingt ou trente ans. Il faut donc l'examiner dès maintenant au regard des durées d'amortissement des investissements. Les exemples sont nombreux où l'on perçoit les difficultés des acteurs à réfléchir en adoptant cette nouvelle approche. Sur ce point, on pourra découvrir un outil intéressant développé par Météo-France pour aider ces acteurs dans leurs prises de décisions, un outil qui permet, dans une région donnée, en cliquant sur une carte, de prévoir quel en sera le climat à des horizons prédéterminés. Cet outil, tout nouveau et très simple, pourrait ainsi grandement faciliter le travail des décideurs, des élus certes, mais aussi de tous ceux qui doivent prévoir l'aménagement du territoire, la réalisation d'investissements. Les effets du réchauffement sont déjà visibles.

Une large partie de ce numéro est consacrée à ce qui est plutôt une nouveauté en France. Le réchauffement n'est pas quelque chose de lointain, ni quelque chose d'hypothétique ou quelque chose qui ne concernerait que les générations futures. C'est une réalité des plus actuelles.

Ainsi, le lecteur pourra découvrir les effets du réchauffement dans les territoires : territoires littoraux, de montagne. Mais aussi sur les ressources et les activités : ressource en eau, production d'énergie, activités en zone de montagne, agriculture. Nous disposerons aussi dans ce numéro d'un état des lieux des effets sur le vivant : la santé humaine (impacts des canicules), la biodiversité (par exemple, la remontée en latitude d'espèces invasives comme la chenille processionnaire ou le moustique tigre).

Le réchauffement climatique, c'est aussi un coût ! Un article d'un représentant de la Caisse centrale de réassurance nous en fournit le détail. Nous pouvons également penser au fameux rapport Stern, qui a été vice-président de la Banque mondiale et a évalué, en 2006, le coût du réchauffement, dans le meilleur des cas, à un peu plus de 1 % du PIB mondial..., à condition de consacrer 1 % de ce même PIB pour contenir l'augmentation des émissions. Dit autrement, si l'humanité consacre moins de 1 % du PIB aux mesures d'atténuation, le coût à supporter sera bien supérieur, pouvant même aller jusqu'à 14 % selon certaines hypothèses. En clair : le coût de la réduction des émissions est inférieur au coût des dommages.

De nombreuses actions sont en cours et portent déjà leurs fruits, avec pour optique de changer le regard que nous portons sur le changement climatique.

La troisième partie de ce numéro est la plus fournie. Cela veut dire que de nombreux acteurs sont désormais orientés vers la mise en place de solutions. Il ne s'agit pas, et il est bon de le répéter, de baisser la garde au regard de la nécessaire réduction des émissions de gaz à effet de serre ; il faut en outre prendre en compte les nécessités de nous préparer à des changements climatiques qui ne sont pas maîtrisés au niveau mondial, donc au niveau national et au niveau local. Il faut donc mener de front atténuation et adaptation.

Cette situation est difficile à gérer ; elle est nouvelle parce qu'elle a sans doute été trop longtemps oubliée (ou plutôt ignorée). Les investissements que nous faisons aujourd'hui ne porteront leurs fruits que demain et, pendant ce temps, le climat aura changé et continuera de changer. Nous n'avons donc pas le choix : l'adaptation doit être rapide, et elle doit aussi anticiper le futur. La recherche climatique menée dans ce contexte ouvre de nouvelles fenêtres sur un futur proche : les émissions de gaz à effet de serre des vingt dernières années dictent le climat des vingt prochaines années. La situation est plus difficile à appréhender quand on se projette à plus long terme. Quand on prévoit un investissement qui va durer cent ans, il est nécessaire d'imaginer la situation à cette échéance. Quand on protège une ville contre les crues d'un cours d'eau, quand on veut reconstruire après une inondation catastrophique..., il ne faut pas faire « comme avant », il ne faut pas se baser sur les plus hautes eaux constatées dans le passé, mais prévoir ce que seront ces plus hautes eaux dans l'avenir.

On verra qu'une large place est laissée à la planification : aux plans européens et aux plans nationaux d'adaptation au changement climatique. Le lecteur pourra aussi se rendre compte dans quelle mesure ces plans sont mis en œuvre.

Mais la complexité de l'adaptation tient à beaucoup d'autres critères et enjeux. Le monde des régions, des villes, des agglomérations est habité par des citoyens, des travailleurs, des entreprises, et c'est à ce niveau que naissent beaucoup d'initiatives. Ces territoires nous montrent le chemin. La question de l'agriculture est elle aussi bien évidemment centrale : assurer l'alimentation des populations passe par une agriculture performante ; celle-ci doit s'adapter à des conditions multiples, en recherchant des pratiques culturelles plus économes en intrants de toutes natures, des produits moins gourmands en eau, et en étant attentive aux enjeux sanitaires...

Développer l'adaptation, c'est au bout du compte essayer de reconstruire le monde d'aujourd'hui, celui où nous vivons, pour le rendre compatible avec des lendemains proches. Nous espérons à travers ce numéro y avoir apporté une contribution utile.

Préambule

Adaptation au changement climatique : mieux définir les enjeux pour engager le débat

Par Ronan DANTEC

Sénateur de Loire-Atlantique et membre du Conseil national de la transition écologique (CNTE)

Le récent échec de la COP de Glasgow dans sa capacité à crédibiliser un scénario partagé de stabilisation du climat sous 1,5°C souligne, sans ambages, l'enjeu d'intégrer sans tarder les questions d'adaptation au réchauffement en cours dans un nombre considérable de politiques publiques.

Nous le savons aujourd'hui de manière quasi certaine : nos contrées, où le réchauffement sera supérieur à la moyenne planétaire, connaîtront, dans les vingt à trente prochaines années, une augmentation des températures se situant entre 3 et 4°C, en fonction de la rapidité et de la réalité de l'application des engagements pris à Glasgow. Pourtant, mon propos ne se veut pas, je me dois de le souligner, particulièrement catastrophiste.

Une augmentation de la température de 3,5°C en France revient tout simplement à un réchauffement mondial de 2,3°C. Ce dernier nombre correspond au scénario intégrant les engagements actuels de réduction pris par les États à Glasgow, et part donc du principe qu'ils seront tenus. Nous faisons donc le pari, déjà optimiste, de la stabilisation du climat à ce niveau, sans boucle de rétroaction trop forte par le jeu de la réduction de la réflexion arctique ou le relargage de grandes quantités du méthane stocké dans le permafrost. Nous ne donnons donc pas d'importantes marges de sécurité, comme nous le faisons souvent en politique publique, mais nous nous contentons de chercher à nous adapter à l'inéluctable, sans imaginer de scénarios plus catastrophistes. J'insiste particulièrement sur ce point. Le passage obligé par une stratégie d'adaptation efficiente contraint à se situer dans le cadre d'un scénario clairement défini, et le plus simple est de se fonder sur les projections découlant des engagements pris dans le cadre de l'Accord de Paris. Ce cadre étant fixé, il s'agit donc, dans le préambule de ce dossier dont je salue l'importance, d'esquisser quelques enjeux prioritaires qui devront se décliner en priorités d'action publique. Elles devront ensuite être constamment affinées et hiérarchisées par rapport à l'importance des impacts, secteur par secteur, mais aussi au regard des chronologies dans la rapidité de survenance des conséquences redoutées.

Il s'agit de débattre démocratiquement, à partir d'analyses étayées, des coûts de chaque mesure au vu des bénéfices attendus et, évidemment, des modèles de financement de ces politiques d'adaptation qui pourraient assez rapidement se révéler particulièrement onéreuses, notamment en ce qui concerne l'adaptation des infrastructures et des réseaux. Un des premiers points à rappeler, voire à éclaircir, est ainsi de souligner que nous allons limiter notre propos aux politiques publiques anticipant et remédiant aux conséquences du réchauffement climatique en France. Nous allons parler de sécheresse et d'inondation, de normes du bâti, de la montée des eaux, de l'évolution des productions agricoles et forestières... Autant de sujets essentiels qui méritent une grande attention. Mais nous ne parlerons pas ici des crises géopolitiques et migratoires, de rupture dans l'équilibre alimentaire mondial, des impacts sur les grands échanges économiques mondiaux..., ce n'est pas le périmètre « classiquement » retenu quand on parle « d'adaptation ». Pourtant, nous le savons tous, ce sont bien à ces grands bouleversements mondiaux que nous risquons d'être confrontés, aussi c'est cette menace globale qui rend absolument vitales des politiques de réduction massive des émissions de CO₂. Sans affectionner particulièrement les phrases définitives, je dois néanmoins souligner que c'est quand même bien là que se joue le destin de l'humanité et que nous avons donc toujours besoin de politiques d'atténuation très volontaristes respectant les préconisations du GIEC. Il faut aussi signaler que nous ne traitons pas ici d'un autre sujet majeur d'adaptation, qui est l'intégration dans nos modes de vie et de production de cette absolue nécessité de nos propres réductions d'émissions de CO₂. L'objectif européen de réduction de 55 % des émissions de CO₂ en 2030 va nécessiter un effort considérable, il est pourtant déjà insuffisant pour rester sous la barre de 1,5°C d'augmentation de la température moyenne mondiale. Ce numéro d'avril 2022 de *Responsabilité & Environnement* avec pour thème l'« Adaptation au changement climatique » va passer en revue nombre de sujets.

Ce préambule n'a donc pour vocation que de simplement esquisser différentes priorités et enjeux. Sans chercher à être exhaustif, j'en définirai néanmoins cinq.

Le premier enjeu est d'ordre démocratique. Il réside dans le droit à l'information et la capacité de construire un débat sérieux et serein. Cet enjeu est complexe et redoutable. Nous savons parfaitement que les pouvoirs publics n'aiment pas inquiéter outre mesure les populations, au risque de retarder la diffusion de l'information, au motif, pas obligatoirement illégitime, de données encore insuffisamment vérifiées... Je suis convaincu que ce retard dans le « porter à connaissance » peut avoir la conséquence inverse, en laissant la place, dans une société où les nouveaux canaux d'information, autrement dit les « réseaux sociaux », sont nombreux et impactants, à des informations mal assimilées, voire fausses. Il en est ainsi de ces cartes particulièrement anxiogènes sur la montée des eaux, où l'on se contente d'appliquer une « côte » supplémentaire et de rayer ainsi, d'un trait de plume, des territoires entiers..., en oubliant toute chronologie (quand et suivant quelle montée des températures) et, évidemment, les capacités réelles, pourtant démontrées par l'histoire, des sociétés humaines à trouver des solutions en matière d'aménagement. Pour éviter des débats anxiogènes et schématiques, il faut absolument que l'État propose des outils de diffusion des connaissances à la fois simples et intelligibles, construits avec les organismes dédiés et la communauté scientifique, qui permettent à chaque citoyen de se projeter facilement dans son propre avenir, sur ce qui est le plus prévisible pour son territoire, à des échéances proches mais aussi lointaines. Cette base de connaissances est aussi particulièrement nécessaire pour les élus locaux, notamment dans leurs choix d'aménagement qui peuvent engager leurs territoires dans la durée.

Le portail DRIAS (son objet : donner accès aux scénarios climatiques régionalisés français sur l'impact du changement climatique et l'adaptation de nos sociétés à celui-ci et à leur environnement) mis en place par l'État en partenariat avec Météo-France, l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) et le Cerfacs (Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique), a été une première étape dans la volonté de créer un outil d'information ouvert à tous. Il s'agit maintenant d'en proposer un plus simple et qui soit « grand public ». En tant que président de la commission spécialisée du Conseil national de la transition écologique (CNTE) chargée de l'orientation et de l'action de l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC), je tiens à souligner la qualité des travaux engagés en ce sens, et je pense que cet outil sera accessible dans quelques mois.

Le deuxième enjeu concerne l'agriculture. C'est clairement le secteur qui est, par définition, le plus exposé aux caprices de la météo, et donc aux évolutions structurelles liées au réchauffement climatique. J'avoue aujourd'hui ma crainte de voir ce secteur chercher plus à retarder qu'à anticiper sa nécessaire mutation. Dans le rapport que nous avons produit avec mon collègue Jean-Yves Roux, sénateur des Alpes de Haute-Provence, au nom de la Délégation à la prospective du Sénat, nous écrivions : « Les projections montrent qu'il faut s'attendre pour l'avenir à des sécheresses agricoles de plus en plus fréquentes et d'une sévérité inconnue à ce jour en France, ce qui, en l'absence de mesures d'adaptation, pourrait très fortement altérer le potentiel de production agricole [...] Confrontée à des perturbations climatiques de plus en plus intenses et fréquentes, ainsi qu'à une rareté croissante de la ressource hydrique, l'agriculture n'a pas d'autre choix que de s'engager résolument dans une politique d'adaptation. Celle-ci devra porter non seulement sur les pratiques et les techniques culturales, mais aussi sur le choix des cultures. »

Je ne vois pas, depuis, une accélération des prises de conscience au-delà de déclarations convenues. Le Varenne agricole de l'eau et du changement climatique, encore en cours à l'heure où j'écris ces lignes, dira où en est la profession, mais je crains le maintien, voire l'exacerbation des tensions. La guerre de l'eau peut tuer, nous l'avons malheureusement constaté à Sivens avec la mort tragique d'un jeune militant. Cette capacité à réguler le partage de cette ressource vitale nous en dira aussi beaucoup sur la capacité de notre société à affronter collectivement ce défi de l'adaptation au changement climatique.

Les dernières annonces faites sur l'évolution du système assurantiel ne donnent pas, par exemple, le bon signal quant à notre capacité collective à anticiper les crises à venir. Utiliser le deuxième pilier de la PAC, celui qui doit financer les transitions, pour abonder un fonds d'assurance structurellement déficitaire, sans qu'apparaissent des modulations de primes ou de couverture en fonction des efforts fournis pour anticiper le réchauffement, pourrait se révéler catastrophique. Finalement, en couvrant seulement les risques sans exiger de contreparties en matière d'évolution des pratiques, le danger est de retarder nos nécessaires adaptations, avec le risque, à terme, d'un effondrement économique brutal de filières agricoles complètes.

Troisième enjeu, une mobilisation des territoires est absolument essentielle. On peut déjà souligner d'importantes mobilisations régionales, sur le modèle du projet AcclimaTerra qui, porté par la région Nouvelle-Aquitaine et la communauté scientifique, repose sur la mise en commun des connaissances et l'écriture de scénarios sur les évolutions attendues. Mais la mobilisation de la maille communale, qui se situe au plus près des conséquences concrètes du réchauffement, reste encore trop disparate. Il me semble ainsi essentiel que les prochains plans Climat-Air-Énergie territoriaux (PCAET), obligatoires dans toutes les intercommunalités de plus de 20 000 habitants, comprennent un véritable diagnostic de vulnérabilité des territoires concernés, débouchant sur des actions pour y remédier. Elles pourraient faire l'objet d'une contractualisation avec l'État dans le cadre des nouveaux contrats de relance et de transition écologique (CRTE).

Le quatrième enjeu à approfondir est celui de la place des « Solutions fondées sur la nature » dans la stratégie à mettre en œuvre. Ce sujet est passionnant ; et il est enthousiasmant d'imaginer que les politiques que nous allons engager pour lutter contre les effets du réchauffement peuvent ainsi nourrir une véritable stratégie nationale de reconquête de la biodiversité. Le rôle des zones humides et des zones d'expansion des crues dans la lutte contre les inondations, la restauration des mangroves pour limiter l'impact de la montée des eaux dans les territoires ultra-marins, la végétalisation des villes pour lutter contre les îlots de chaleur et, par là même, la création de véritables écosystèmes urbains... les opportunités ne manquent pas. Néanmoins, ce rôle joué par les « Solutions fondées sur la nature » étant devenu un passage obligé de tout discours sur l'adaptation au changement climatique, il va être nécessaire de l'affiner, de mieux caractériser ces solutions tant au regard de leur faisabilité que de leur impact, de voir comment elles s'inscrivent dans une stratégie de biodiversité plus globale pour qu'elles n'apparaissent pas comme des solutions miracles, et donc décevantes à terme.

Enfin, et c'est le dernier grand enjeu que j'aborderai ici, la mobilisation de notre société et de la puissance publique face à ce défi considérable qui nous accompagnera tout au long du XXI^e siècle, nécessite une solidarité accrue. Face aux défis du réchauffement, nous nous devons de faire société, d'imaginer des solutions qui renforcent notre cohésion et notre vivre-ensemble. La véritable expérience de la canicule de 2003, dont les victimes étaient souvent des personnes seules et isolées, a montré l'importance d'une culture de l'attention portée à l'autre, à sa voisine ou à son voisin de palier. Elle a souligné le rôle du service public : quand le facteur est aussi une sentinelle, en capacité de vigilance quand le courrier non relevé alerte sur une possible détresse. Nous avons affiné ces outils de vigilance en période de crise : ainsi, les centres communaux d'action sociale (CCAS) disposent aujourd'hui de listes de personnes vulnérables à appeler en période de canicule. C'est un exemple concret d'adaptation, il faut encore renforcer les actions en la matière. Nous devons ainsi construire des outils de mutualisation face aux risques encourus. Ce n'est évidemment pas à une famille de supporter seule les conséquences d'un réchauffement qui peut entraîner la perte de son domicile, la solidarité nationale doit jouer. C'est aujourd'hui le cas à travers les couvertures assurantielles et le fonds Barnier, mais cette solidarité doit surtout se concrétiser dans une logique de réponse collective aux catastrophes naturelles. Il est évident que les sommes conséquentes que vont nécessiter les politiques de prévention des risques liées aux aléas climatiques appellent une révision en profondeur de la manière d'abonder ces fonds. À titre d'exemple, les sommes nécessaires pour réaliser des travaux et financer l'indemnisation de propriétaires confrontés au recul du trait de côte du fait de la montée des eaux vont, à elles seules, largement dépasser, dans les prochaines années, le total des sommes collectées dans le cadre du fonds Barnier. De nouveaux mécanismes de mutualisation et d'intervention de l'État devront être définis. Sur ce point, il nous faudra rapidement écarter l'hypothèse d'une gestion et d'un financement assurés à la maille du bloc communal, qui amènerait de petites inter-communalités à devoir financer des travaux, dont les coûts se situent très au-delà de leurs capacités budgétaires.

Débattre de l'adaptation est essentiel pour notre avenir, pour prioriser nos interventions et anticiper des évolutions inéluctables. Plus le débat public sera étayé et approfondi, et plus vite nous intégrerons dans nos politiques d'aménagement, de l'ouvrage d'art au plan d'urbanisme, ces contraintes que nous ne pouvons plus ignorer. Et plus vite nous serons en capacité d'apporter des réponses robustes et financièrement maîtrisées aux conséquences du réchauffement. Ce débat s'inscrit aujourd'hui dans un calendrier fixé à la suite de la décision de l'État visant à mener cette réflexion dans le cadre du PNACC3 (plan national d'adaptation au changement climatique n°3), lequel s'articule avec le débat qui s'engage avec les différents acteurs concernés dans le but de nourrir la prochaine loi de programmation quinquennale sur l'énergie et le climat. C'est un choix important, c'est même une reconnaissance, même si la loi ne met pas sur le même plan SNBC (Stratégie nationale bas-carbone), PPE (Programmation pluriannuelle de l'énergie) et PNACC, de l'importance des politiques d'adaptation, qui sont ainsi mises au même niveau et bénéficient du même calendrier que les documents stratégiques d'atténuation. C'est une opportunité précieuse pour faire en sorte que la société française se saisisse de ces enjeux et commence à les hiérarchiser et à les quantifier, au-delà des nécessaires slogans d'alerte. Ce numéro d'avril 2022 de *Responsabilité & Environnement* vient donc à point nommé pour nourrir ce débat collectif.

Les principaux enseignements du 6^e rapport du groupe I du GIEC

Par David SALAS Y MÉLIA

Chercheur climatologue au Centre national de recherches météorologiques (Météo-France et Centre national de la recherche scientifique)

Le groupe I du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) a publié, en août 2021, son 6^e rapport sur les bases scientifiques du changement climatique. Ce rapport réaffirme le fait que l'origine humaine des changements climatiques observés depuis la deuxième moitié du XIX^e siècle est sans équivoque, qu'il s'agisse du réchauffement mondial (+ 1,1°C), du recul des neiges et des glaces, de l'acidification des océans ou de la hausse du niveau marin. L'une des avancées majeures du rapport est de mettre en évidence l'influence humaine sur l'intensité et la fréquence de phénomènes extrêmes tels que les vagues de chaleur ou les fortes pluies. Les évolutions observées du climat vont se poursuivre – il est notamment acquis que la température du globe atteindra le seuil de 1,5°C d'ici à vingt ans –, mais elles peuvent encore être contenues si des actions fortes, rapides et durables de réduction des émissions de CO₂ sont menées.

Qu'est-ce que le GIEC ?

Le GIEC (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, en anglais) est un organisme de l'ONU fondé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations unies pour l'environnement. Contrairement à une idée reçue, il ne s'agit pas d'un laboratoire de recherche. Ses membres sont des États, actuellement au nombre de 195. Il a pour principales missions d'évaluer l'information scientifique, technique et socio-économique sur le changement climatique à partir d'études publiées dans des revues spécialisées et de produire des avis scientifiques indépendants pour servir aux négociations climatiques internationales se déroulant dans le cadre des Conférences des parties. Le GIEC comporte trois groupes de travail : le groupe I « Bases scientifiques du changement climatique », le groupe II « Impacts, adaptation et vulnérabilité » et le groupe III « Atténuation du changement climatique ». Ces trois groupes sont complétés par une équipe spéciale pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, qui développe un guide méthodologique pour le suivi des émissions.

Lors de sa 43^e réunion plénière à Nairobi (en 2016), le GIEC a accepté la demande de la COP21 de préparer un rapport spécial (SR1.5, paru en 2018) sur les conséquences d'un réchauffement mondial de 1,5°C. Il a été également décidé de produire deux autres rapports spéciaux, tous deux parus en 2019, l'un sur le changement climatique et les terres émergées (SRCCL) et l'autre sur les liens entre le changement climatique, l'océan et la cryosphère (SROCC). Le GIEC a également confirmé la préparation de rapports d'évaluation

complets tous les 5 à 7 ans, et a précisé les contours du 6^e rapport d'évaluation.

Le résumé à l'intention des décideurs du 6^e rapport d'évaluation (RE6) du groupe I a été approuvé le 9 août 2021, à l'issue de la 54^e réunion plénière du GIEC et de 15 jours de session en ligne, en raison de la pandémie de Covid-19. Le rapport complet a été préparé par 234 auteurs provenant de 65 pays. Structuré en 12 chapitres, il compte près de 4 000 pages et s'appuie sur l'évaluation de 14 000 articles scientifiques. Il est complété par un atlas interactif accessible en ligne, qui permet de visualiser l'évolution de différentes variables caractérisant le climat (température, précipitations, etc.) pour une région, un scénario socio-économique et un horizon temporel donnés. Le rapport du groupe II a été publié fin février, celui du groupe III le sera au cours de ce mois, et le rapport de synthèse du RE6 paraîtra en septembre 2022.

Les nouveautés du RE6

Le groupe I du GIEC a pu bénéficier pour l'élaboration du RE6 (IPCC, 2021) de sept années supplémentaires d'observations depuis le 5^e rapport d'évaluation, de nouvelles connaissances scientifiques et du jeu de simulations climatiques du projet CMIP6 (Eyring *et al.*, 2016) réalisées via une nouvelle génération de modèles de climat¹. Les projections futures réalisées

¹ Au 17 février 2022, la base de données CMIP6 intégrait les simulations de 118 modèles développés et mis en œuvre par 53 institutions de modélisation climatique, dont les équipes françaises de l'IPSL et du CNRM-CERFACS. Le GIEC a pris en compte une cinquantaine de modèles dont les résultats étaient disponibles lors de la préparation du rapport.

Récits socio-économiques	Dénomination	Trajectoires d'émissions mondiales de CO ₂
« Développement durable » : forte coopération internationale	SSP1-1.9	Les émissions décroissent très fortement à partir de 2020, puis deviennent nulles peu après 2050, avant d'être négatives (- 14 Gt ^a CO ₂ en 2100).
	SSP1-2.6	Les émissions décroissent très fortement à partir de 2020, puis deviennent nulles vers 2075, avant d'être négatives (- 9 GtCO ₂ en 2100).
Poursuite des tendances actuelles	SSP2-4.5	Les émissions augmentent faiblement, avant de plafonner à 44 GtCO ₂ vers 2040 et de diminuer jusqu'à 10 GtCO ₂ en 2100.
Monde fragmenté, croissance économique faible et peu d'efforts en faveur de l'environnement	SSP3-7.0	Les émissions augmentent pour atteindre 82 GtCO ₂ en 2100.
Croissance rapide, mais une forte dépendance aux énergies fossiles	SSP5-8.5	Les émissions augmentent fortement jusqu'en 2090 (130 GtCO ₂), puis décroissent légèrement.

Tableau 1 : Scénarios socio-économiques utilisés (repris dans cet article(et trajectoires d'émissions nettes (ensemble des émissions humaines vers l'atmosphère moins les retraits opérés) mondiales de dioxyde de carbone (CO₂)^b. Les scénarios mentionnés incluent également les trajectoires d'émissions des principaux autres gaz à effet de serre, des aérosols et précurseurs (Rogelj *et al.*, 2018 ; Gidden *et al.*, 2019). Tous les scénarios retiennent le même niveau d'émissions de CO₂ en 2015, soit 39 GtCO₂.

^a 1 Gt correspond à 1 milliard de tonnes.
^b Les valeurs fournies dans cette table proviennent de la base de données hébergée par l'Energy Program du IIASA (<https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb>).

à partir de CMIP6 reposent sur les nouveaux scénarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) (O'Neill *et al.*, 2017), qui améliorent l'ancienne génération des RCP² en les combinant avec différents récits socio-économiques (voir le Tableau 1 ci-dessus).

Une avancée majeure du RE6 a été d'ajuster les projections de température et d'élévation du niveau de la mer en s'appuyant sur des archives paléo-climatiques et des observations, ce qui a permis de réduire la dispersion des estimations futures. Ce travail n'a cependant pas pu être mené pour d'autres variables. L'une des autres évolutions du rapport est de présenter certains changements futurs non seulement pour un scénario et un horizon donnés, mais également pour des niveaux de réchauffement mondial de 1,5°C, 2°C et 4°C par rapport au climat préindustriel. Comme dans le rapport spécial SR1.5, cela permet de faire le lien avec les cibles de réchauffement mentionnées dans l'Accord de Paris³ et le rapport, et également de nourrir les futures négociations climatiques. Le GIEC met ainsi clairement en évidence que chaque incrément de température mondiale compte, et se traduit par des changements sensibles, même entre des cibles aussi proches que 1,5 et 2°C.

² Representative Concentration Pathways (Van Vuuren *et al.*, 2011).
³ L'objectif de l'Accord de Paris est de limiter le réchauffement climatique à un niveau bien inférieur à 2°C, de préférence à 1,5°C, par rapport au niveau préindustriel.

Par ailleurs, le RE6 accorde une place importante aux études d'attribution, qui permettent, le cas échéant, de préciser le lien entre les perturbations du climat d'origine humaine et un changement observé, dont les tendances de long terme ou l'évolution de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes.

Des concentrations de gaz à effet de serre en forte hausse

En 2019, la concentration atmosphérique du dioxyde de carbone (CO₂) était de 410 ppm⁴, soit une augmentation de 47 % par rapport au niveau préindustriel – un niveau inédit depuis au moins deux millions d'années. Cette augmentation est due aux activités humaines, parmi lesquelles les changements d'usage des sols, la production de ciment et la combustion de ressources fossiles. La concentration en méthane (CH₄) a également fortement augmenté (+ 156 %), principalement en raison des émissions liées à l'élevage, à la riziculture et aux décharges ; elle atteint 1 866 ppb⁵. L'augmentation de la concentration en oxyde nitreux (+ 23 %, 332 ppb en 2019) est, quant à elle, principalement due à la dégradation des engrais azotés.

⁴ 1 ppm correspond à 1 cm³ dans 1 m³ d'air.
⁵ 1 ppb correspond à 1 mm³ dans 1 m³ d'air.

Évolution du climat moyen

Sur la période 2011-2020, la température moyenne mondiale était plus élevée d'environ 1,1°C par rapport à celle de la période 1850-1900⁶, le réchauffement moyen des continents (+ 1,6°C) étant plus prononcé que celui des océans (+ 0,9°C). Les experts du GIEC affirment désormais que intégralité de ces changements sont liés aux activités humaines, essentiellement sous l'effet de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, des aérosols⁷ et des changements d'utilisation des sols. Si les facteurs naturels susceptibles d'influer sur le climat, tels que les variations du rayonnement solaire ou les éruptions volcaniques intenses, ainsi que les variations spontanées du climat peuvent conduire à des changements temporaires de la température moyenne du globe, leur contribution au réchauffement de long terme observé depuis le XIX^e siècle est négligeable.

La température moyenne mondiale à la fin de ce siècle sera plus élevée que celle enregistrée aujourd'hui, et ce quel que soit le scénario retenu (voir la Figure 1 ci-dessous). Il est probable que le seuil de 1,5°C sera franchi au cours des vingt prochaines années. À l'horizon 2041-2060, le réchauffement devrait légèrement dépasser le seuil de 1,5°C même dans le scénario SSP1-1.9 qui repose sur de très fortes réductions des émissions, et pourrait atteindre près de 2,5°C (une valeur qui n'a jamais été durablement atteinte depuis plus de trois millions d'années) dans le scénario à fortes

émissions SSP5-8.5. En fin de siècle (2081-2100), le réchauffement mondial sera très probablement inférieur à 2°C si le scénario SSP1-1.9 est suivi, mais pourrait atteindre 4 à 5°C dans le cas du scénario SSP5-8.5.

Le cycle hydrologique mondial s'est intensifié, ce qui se traduit notamment par une augmentation depuis 1950 des précipitations en moyenne sur l'ensemble des continents, cette tendance se renforçant à partir des années 1980. Cependant, cette augmentation moyenne recouvre de fortes différences régionales, puisque le cumul annuel des précipitations tend à diminuer dans les régions relativement sèches et à augmenter dans les régions plus arrosées. Au cours du XXI^e siècle, les précipitations devraient augmenter dans les régions polaires, dans le Pacifique équatorial et dans certaines régions soumises à un régime de mousson, tandis qu'elles devraient diminuer dans les régions subtropicales, notamment dans le Bassin méditerranéen, et dans certaines régions tropicales. Ces baisses et ces hausses régionales des précipitations seront d'autant plus importantes que le réchauffement planétaire sera marqué. Dans les régions les plus touchées, ces hausses pourraient atteindre 20 % avec 2°C de réchauffement et 40 % avec 4°C.

L'eau disponible pour alimenter les cours d'eau et les nappes souterraines est déterminée par les précipitations, auxquelles il faut retrancher l'évaporation de surface (sols, végétation, etc.). Or, l'évaporation tend à augmenter en raison du réchauffement. Cela implique que les ressources en eau pourraient même diminuer dans des régions où le volume des précipitations n'évolue pas ou augmente faiblement.

⁶ D'un point de vue climatique, la période 1850-1900 peut être assimilée à l'ère préindustrielle.
⁷ Particules liquides ou solides en suspension dans l'atmosphère, d'origine humaine ou naturelle, et qui ont, pour la plupart, tendance à refroidir le climat.

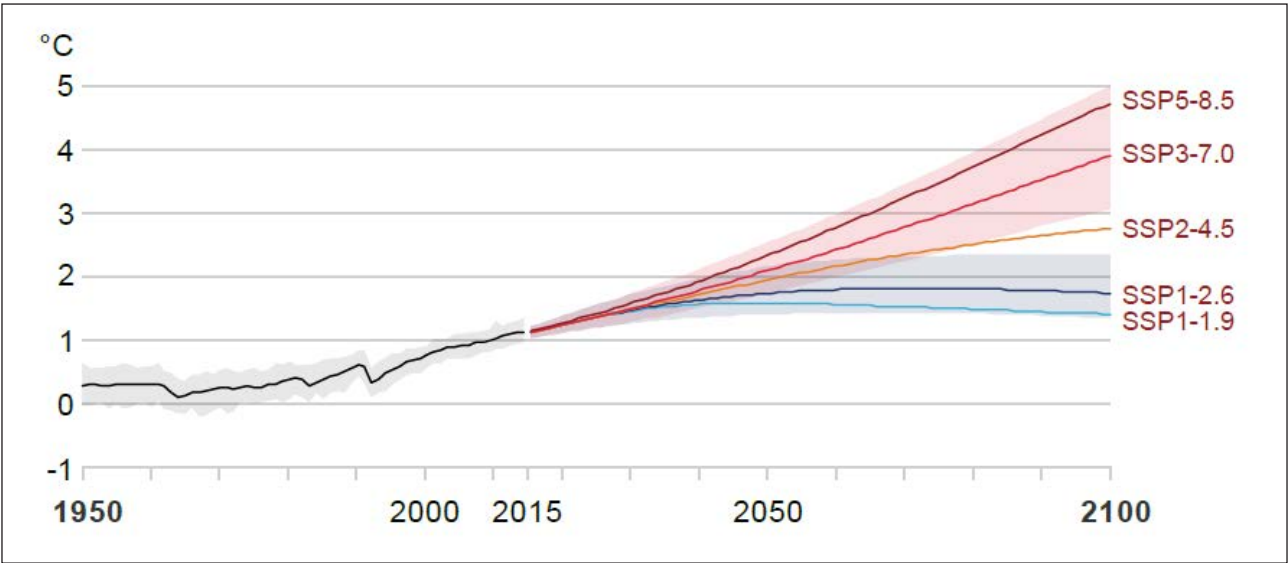


Figure 1 : Changements de la température moyenne mondiale (°C) par rapport à la période 1850-1900 simulés par les modèles CMIP6 ajustés par les observations faites sur la période récente. Sur la période 1950-2014, la courbe en noir représente la moyenne des simulations historiques et l'enveloppe en gris leur dispersion. Sur la période 2015-2100, les courbes colorées représentent la moyenne des projections pour chacun des scénarios, et les enveloppes en bleu et rouge clair leur dispersion, respectivement pour les scénarios SSP1-2.6 et SSP5-8.5 (d'après la figure SPM.8 a) du RE6).

L'influence de l'activité humaine sur les phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes

Depuis la publication du dernier rapport du GIEC, de nombreux phénomènes climatiques et météorologiques extrêmes se sont produits, comme les canicules enregistrées en France et en Australie (2019), en Sibérie (2020), dans le nord-ouest de l'Amérique et dans le sud de l'Europe (2021), ou encore les pluies extrêmes qui ont frappé l'Allemagne (2021), pour ne citer que quelques-uns des événements les plus récents. La multiplication de ce type de phénomènes intenses mais aussi l'amélioration des techniques statistiques permettent de renforcer le degré de certitude des études d'attribution.

Les experts du GIEC estiment ainsi, avec un niveau de confiance élevé, que l'influence humaine contribue à l'augmentation de la fréquence et de la sévérité des phénomènes de chaleur extrême dans pratiquement toutes les régions du globe. Il a été établi que, sur l'ensemble des continents, les chaleurs extrêmes qui se produisaient en moyenne une fois par décennie sur la période 1850-1900 sont environ trois fois plus fréquentes sous le climat actuel, le seront quatre fois plus avec 1,5°C de réchauffement mondial, et pourraient même être observées pratiquement tous les ans avec un réchauffement de 4°C (voir la Figure 2a ci-contre). En termes d'intensité, il est attendu que les températures annuelles les plus chaudes progressent dans de nombreuses régions 1,5 à 2 fois plus rapidement que la température moyenne mondiale, et jusqu'à 3 fois en Arctique. Les froids extrêmes sont de moins en moins intenses et de moins en moins fréquents, mais ne disparaissent pas pour autant. Les projections futures suggèrent que tout au long du XXI^e siècle, les températures de ces régions vont continuer à se réchauffer plus rapidement que la température moyenne du globe, notamment en Arctique.

Les experts du GIEC concluent que les précipitations extrêmes se sont intensifiées dans pratiquement toute l'Asie et toute l'Europe, ainsi que dans certaines régions d'autres continents. Ces épisodes fortement pluvieux sont aussi de plus en plus souvent observés, puisque ces événements qui se produisaient en moyenne une fois par décennie sur la période 1850-1900 voient désormais leur fréquence augmentée de 30 % environ⁸. Une augmentation de fréquence qui pourrait même être de 50, 70, voire 170 %, respectivement pour des niveaux de réchauffement mondial de 1,5°C, 2°C et 4°C (voir la Figure 2b ci-contre). L'intensité des précipitations devrait, quant à elle, augmenter d'environ 7 % par degré de réchauffement. Par ailleurs, les sécheresses agricoles et écologiques frappant les régions qui tendent déjà à s'assécher sont désormais 70 % plus fréquentes que celles observées sur la période 1850-1900. Elles pourraient devenir respectivement 2 et 4 fois plus fréquentes à 1,5°C et 4°C de réchauffement planétaire (voir la Figure 2c ci-contre).

⁸ Leur durée de retour est donc passée de 10 ans au XIX^e siècle à 7-8 ans dans le contexte climatique actuel.

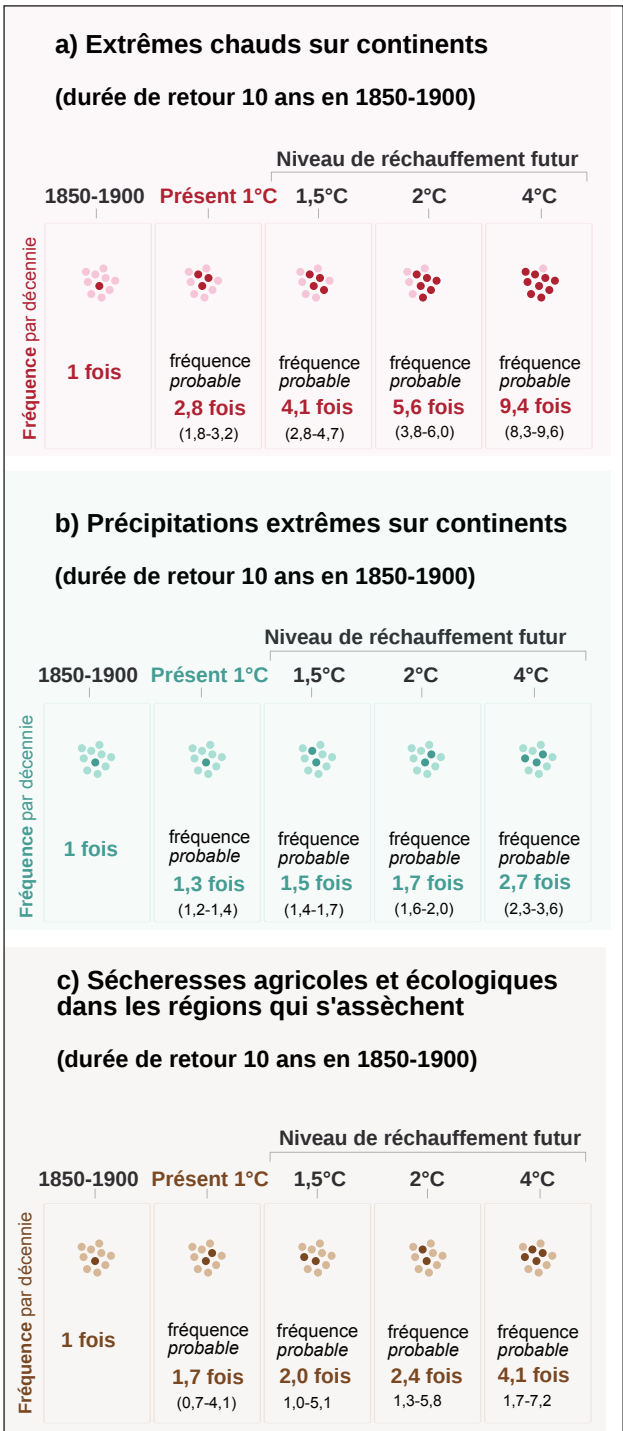


Figure 2 : Changements projetés de la fréquence a) des extrêmes chauds de température sur les continents ; b) des précipitations extrêmes sur les continents ; et c) des sécheresses agricoles et écologiques dans les régions qui s'assèchent.

Les changements projetés sont présentés à des niveaux de réchauffement mondial correspondant à 1°C, 1,5°C, 2°C et 4°C par rapport à 1850-1900, qui représente un climat sans influence humaine. Les extrêmes chauds de température et les événements extrêmes en matière de précipitations correspondent au maximum journalier dépassé une fois par décennie. Les événements de sécheresses agricoles et écologiques correspondent à une moyenne annuelle de l'humidité sur la colonne de sol inférieure au dixième pourcentile sur la période 1850-1900 (d'après la figure SPM.6 du RE6).

Pour la première fois, ce rapport affirme que la proportion de cyclones tropicaux violents observés a augmenté, même si aucune tendance sur l'évolution du nombre total de ces événements n'a été mise en évidence. Le rail des tempêtes se situant dans les moyennes latitudes des deux hémisphères s'est déplacé vers les pôles, mais sans changement détectable de la force du vent. Il est attendu que le réchauffement futur accentue ces tendances, et que les précipitations associées aux cyclones et aux tempêtes augmentent.

Océan et cryosphère

Le manteau neigeux de l'hémisphère nord a régressé depuis les années 1950, particulièrement au printemps. Depuis le début des années 1980, le minimum annuel de surface de la banquise⁹ arctique a reculé d'environ 40 %, se situant ainsi à un niveau probablement inédit depuis un millénaire. En revanche, la banquise antarctique n'a pas connu d'évolution significative. Les grandes calottes continentales des deux hémisphères perdent d'importantes quantités de glace, mais pour des raisons différentes : fonte de surface dans le cas du Groenland et décharge d'icebergs dans celui de l'Antarctique. L'influence humaine sur l'ensemble des changements observés est incontestable, sauf pour ce qui concerne l'Antarctique. Les projections futures indiquent que ces tendances vont se poursuivre, et le permafrost pourrait reculer fortement en cas de réchauffement mondial important.

L'océan superficiel (jusqu'à 700 m de profondeur) s'est réchauffé depuis les années 1970 sous l'influence de l'activité humaine. Cela conduit à un phénomène de dilatation qui, s'ajoutant notamment à la fonte des calottes glaciaires et des glaciers continentaux, contribue à la hausse du niveau marin. Celle-ci s'accélère : de l'ordre de 1,3 mm/an entre 1901 et 1971, elle est passée à 1,9 mm/an entre 1971 et 2006, puis à 3,7 mm/an entre 2006 et 2018. En 2018, la montée du niveau moyen des mers par rapport à 1901 était d'environ 0,20 m. Elle va se poursuivre même dans le scénario SSP1-1.9, atteignant 0,44 à 0,71 m en 2100, et pourrait se situer entre 0,79 et 1,20 m dans le scénario SSP5-8.5, avec à la clé des risques de submersion et d'altération des ressources en eau dans de nombreuses régions côtières se situant à basse altitude. Dans ce même scénario, une hausse approchant les 2 mètres en 2100 et les 5 mètres en 2150 ne peut être exclue, en cas de déstabilisation des calottes glaciaires. Par ailleurs, l'océan absorbe une part significative des émissions humaines de CO₂ (23 % sur la période 2010-2019 ; pour la biosphère continentale, cette part est de 31 %). L'une des conséquences de cette absorption est une acidification de l'océan, laquelle va se poursuivre et pourrait se traduire, dans le scénario SSP5-8.5, par une baisse du pH de 0,4 unité en 2100 par rapport aux conditions

⁹ La banquise, également appelée glace de mer, est une couche de glace résultant de la congélation de l'eau de mer. Elle peut atteindre quelques mètres d'épaisseur, mais ne doit pas être confondue avec les calottes glaciaires, des masses de glaces continentales pouvant atteindre 4 000 mètres d'épaisseur en Antarctique et résultant de l'accumulation neigeuse.

actuelles. En cas d'émissions modérées à fortes de gaz à effet de serre, l'acidification, conjuguée à la désoxygénation et à la multiplication des « vagues de chaleur marines », pourrait gravement impacter la vie marine et les populations humaines qui en dépendent.

Chaque tonne de CO₂ émise contribue au réchauffement

Les experts du GIEC confirment le lien quasi linéaire entre le cumul des émissions mondiales de CO₂ depuis 1850 et le réchauffement observé ($0,45 \pm 0,18^\circ\text{C}$ pour 1 000 GtCO₂). Sur la période 1850-2019, 2 390 Gt de CO₂ ($\pm 10\%$) ont été émises, ce qui permet d'estimer la quantité d'émissions cumulées à ne pas dépasser pour pouvoir atteindre une cible de température donnée. Il ressort ainsi, par exemple, que l'objectif de $1,5^\circ\text{C}$ a une chance sur deux d'être respecté si les émissions de CO₂ ne dépassent pas, à partir de début 2020, un total de 500 Gt de CO₂ (83 % de chances en limitant le cumul des émissions à 300 GtCO₂). Le cumul à respecter pour avoir une chance sur deux de respecter la cible moins ambitieuse de 2°C s'élève à 1 350 Gt de CO₂. Les émissions humaines de CO₂, qui étaient de l'ordre de 41 GtCO₂/an pour la période 2010-2019, devront donc diminuer fortement et très rapidement. Mais il faudra également procéder à des extractions massives de CO₂ atmosphérique pour pouvoir se rapprocher des scénarios compatibles avec l'Accord de Paris (SSP1-1.9 et SSP1-2.6 – Voir le Tableau 1 de la page 12).

Conclusion

Le RE6 du groupe I du GIEC repose sur un travail d'évaluation colossal, auquel les équipes françaises de recherche sur le climat ont largement contribué. S'il confirme un socle de connaissances déjà bien établies portant sur les bases physiques du changement climatique, il les complète sur beaucoup d'aspects à la lumière des travaux scientifiques les plus récents, fournissant ainsi autant de raisons d'agir fortement et rapidement pour stabiliser le climat. L'un des messages forts du RE6 est de dissiper l'idée que nos actions n'auraient pas d'effets avant la fin du siècle, et ce en raison de l'inertie du climat. Pourtant, il apparaît que de fortes et rapides réductions des émissions humaines de CO₂ devraient avoir un effet indéniable sur la température moyenne mondiale, et ce dès 2040. Il a également été mis en évidence que la dérive du climat sera faible si les émissions nettes de CO₂ restent nulles à partir du moment où le budget carbone compatible avec la cible de réchauffement fixée à 2°C sera atteint. Cela montre que le climat futur dépendra avant tout des actions humaines, notamment de la capacité des systèmes socio-économiques à réussir la transition énergétique bas-carbone.

Bibliographie

EYRING V., BONY S., MEEHL G. A., SENIOR C. A., STEVENS B., STOUFFER R. J. & TAYLOR K. E. (2016), "Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization", *Geoscientific Model Development* 9(5), pp. 1937-1958.

GIDDEN M. J., RIAHI K., SMITH S. J., FUJIMORI S., LUDERER G., KRIEGLER E., VAN VUUREN D. P., VAN DEN BERG M., FENG L., KLEIN D., CALVIN K., DOELMAN J. C., FRANK S., FRICKO O., HARMSSEN M., HASEGAWA T., HAVLIK P., HILAIRE J., HOESLY R., HORING J., POPP A., STEHFEST E. & TAKAHASHI K. (2019), "Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century", *Geosci. Model Dev.* 12, pp. 1443-1475, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1443-2019>

IPCC (2021), "Climate Change 2021: The Physical Science Basis", Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, MASSON-DELMOTTE V., ZHAI P., PIRANI A., CONNORS S. L., PÉAN C., BERGER S., CAUD N., CHEN Y., GOLDFARB L., GOMIS M. I., HUANG M., LEITZELL K., LONNOY E.,

MATTHEWS J. B. R., MAYCOCK T. K., WATERFIELD T., YELEKÇİ O., YU R. & ZHOU B. (eds.), Cambridge University Press (sous presse).

O'NEILL B. C., KRIEGLER E., EBI K. L., KEMP-BENEDICT E., RIAHI K., ROTHMAN D. S., VAN RUIJVEN B. S., VAN VUUREN D. P., BIRKMANN J., KOK K., LEVY M. & SOLECKI W. (2017), "The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century", *Global Environmental Change* 42, pp. 169-180.

ROGELJ J., POPP A., CALVIN K. V., LUDERER G., EMMERLING J., GERNAAT D., FUJIMORI S., STREFLER J., HASEGAWA T., MARANGONI G., KREY V., KRIEGLER E., RIAHI K., VAN VUUREN D. P., DOELMAN J., DROUET L., EDMONDS J., FRICKO O., HARMSSEN M., HAVLIK P., HUMPEÑÖDER F., STEHFEST E. & TAVONI M. (2018), "Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5°C", *Nature Climate Change* 8, pp. 325-332.

VAN VUUREN D. P., EDMONDS J., KAINUMA M., RIAHI K., THOMSON A., HIBBARD K. *et al.* (2011), "The representative concentration pathways: an overview", *Climatic change* 109(1), pp. 5-31.

Impacts du changement climatique à l'échelle mondiale : principaux enseignements du dernier rapport du groupe de travail II du GIEC

Par **Éric BRUN** et **Lisa BOSTVIRONNOIS**

ONERC

Dans cet article, nous présentons les principaux impacts, déjà observés ou projetés, du changement climatique sur les systèmes naturels et humains, à l'échelle mondiale. Nous nous appuyons sur le dernier rapport du GT2 du GIEC – un document de plusieurs milliers de pages – et souhaitons donner au lecteur quelques clés pour mieux en appréhender les résultats dans les domaines qui l'intéressent.

Les impacts déjà visibles dans le monde et leur attribution au changement climatique

La publication, le 28 février 2022, de la contribution du groupe de travail II (GT2) au 6^e rapport d'évaluation du GIEC (AR6) (GIEC, 2022) a ainsi permis de diffuser les connaissances scientifiques accumulées depuis plus de sept ans sur les impacts du changement climatique dans le monde et sur les multiples enjeux que pose l'adaptation à ceux-ci. Autant dire que ces nouvelles informations vont irriguer pendant de nombreuses années les réflexions sur les risques induits par le changement climatique et guider les politiques d'adaptation internationales, européennes, nationales et territoriales.

Il est évidemment difficile de synthétiser en quelques pages tous les messages véhiculés par ce rapport. Aussi avons-nous pris le parti d'évoquer seulement les principaux et de renvoyer le lecteur aux parties du rapport lui permettant d'approfondir sa réflexion sur les points qui l'intéressent.

Les impacts observés sur les systèmes naturels et anthropiques

Le rapport du GT2 distingue le plus souvent les impacts sur les systèmes naturels de ceux sur les systèmes humains, sans oublier de rappeler régulièrement leurs liens intimes, en particulier au travers des services écosystémiques. Dans les deux cas, les impacts sont très majoritairement négatifs.

Impacts observés sur les systèmes naturels

Avec un réchauffement planétaire ayant déjà atteint 1,1°C durant la dernière décennie par rapport à l'ère pré-industrielle, les impacts sur les systèmes naturels sont à la fois plus étendus et plus élevés que ce qui était estimé dans les rapports précédents. Cela a entraîné, dans la plupart des régions, des baisses des populations animales et végétales, et même des extinctions à l'échelle du globe. La mortalité en masse d'arbres sur les continents, la destruction de récifs de coraux tropicaux et de forêts de lamières en mer, le déplacement d'espèces vers les pôles ou vers des altitudes plus élevées, autant d'illustrations qui figurent parmi les exemples-clés cités.

En ce qui concerne les écosystèmes marins, une attention particulière est portée aux impacts de vagues de chaleur marines de plus en plus fréquentes et à l'acidification qui se poursuit et ne cesse de s'étendre.

Les événements extrêmes jouent un rôle différent de la dérive lente du climat, car ils amènent à s'approcher, voire à dépasser certains seuils critiques, conduisant à des mortalités massives pour des centaines d'espèces, s'accompagnant d'un affaiblissement de l'intégrité des écosystèmes, de leur résilience et de leur capacité naturelle d'adaptation.

Le « verdissement » observé dans certaines régions (désertiques, boréales ou de savane), dû à l'effet fertilisant de la concentration atmosphérique accrue du CO₂, mais aussi à une saison de croissance plus longue (dans les régions boréales), est abordé dans le chapitre 2 du rapport.

Quelques cartes mondiales décrivent certains des impacts observés sur les systèmes naturels dans les

chapitres 2 et 3 du rapport ; aucune carte mondiale ne cherche en revanche à synthétiser ces impacts. En effet, cela obligerait à hiérarchiser les impacts observés qui sont très divers, ce qui serait un exercice difficile, dans la mesure où les lecteurs potentiels du rapport ont leurs propres centres d'intérêt, qui sont eux aussi très divers. Une information plus détaillée sur les impacts observés est accessible dans les chapitres régionaux (9 à 15) et dans les chapitres transversaux du rapport.

Le rapport de l'atelier conjoint IPBES/GIEC (Pörtner *et al.*, 2021) et le premier rapport d'évaluation sur la Méditerranée (Cramer *et al.*, 2020) apportent des éléments complémentaires sur les impacts du changement climatique sur la biodiversité continentale ou marine.

Impacts observés sur les systèmes humains

Le rapport identifie un ensemble considérable d'impacts du changement climatique déjà observés sur les systèmes humains.

Une grande partie des impacts sont associés à la problématique générale de l'eau

Ces impacts observés sont de natures très diverses. Il y a évidemment l'impact sur les ressources alimentaires, par exemple les cultures ne pouvant plus être irriguées à la suite de sécheresses ou l'impossibilité pour le bétail de se nourrir. La rareté de l'eau a ainsi des impacts directs sur la santé, car elle entraîne souvent une baisse de la qualité de cette dernière, en particulier dans les pays en développement. Les sécheresses favorisent aussi l'occurrence de méga-feux et affectent la production d'hydro-électricité dans de nombreux endroits du monde. Ces sécheresses sont généralement dues à une augmentation de l'évapotranspiration causée par le réchauffement, car le nombre des régions ayant enregistré une augmentation des précipitations annuelles est bien plus important que celui des régions ayant connu une baisse. La fonte de la neige et des glaces, généralisée sur la planète, affecte de façon quasi directe les régimes hydrologiques de très nombreux fleuves et rivières, avec des conséquences importantes pour l'agriculture des régions concernées. L'augmentation globale en moyenne de l'intensité des précipitations génère, quant à elle, des épisodes de crue, dont l'intensité et/ou l'étendue ont dépassé dans de nombreuses régions des records historiques. La hausse du niveau des mers est également à l'origine de la salinisation de certaines nappes d'eau douce côtières, ce qui perturbe l'accès à l'eau potable et l'agriculture.

Des impacts sont également observés sur des infrastructures critiques (les infrastructures ferroviaires, par exemple), en lien le plus souvent avec les chaleurs extrêmes, les inondations et la hausse du niveau des mers

La proportion croissante de cyclones de forte intensité contribue à une augmentation des dégâts associés, même si aucune tendance n'est observée sur la fréquence même de ces phénomènes météorologiques. La fonte du pergélisol, généralisée dans les régions polaires de l'hémisphère nord et sur le plateau tibétain, cause de nombreux dégâts sur les infrastructures des régions concernées.

Des impacts négatifs sont observés dans le domaine de la santé physique : zoonoses reliées au climat, maladies véhiculées par la nourriture ou l'eau, maladies cardio-vasculaires liées à la chaleur, maladies vectorielles

Le rapport identifie en outre des impacts dans le domaine de la santé mentale, notamment à la suite de la survenue de catastrophes climatiques ou bien de la perte de repères culturels, par exemple dans les régions où la cryosphère fait partie de l'environnement quotidien.

Tous ces impacts ont eu des conséquences économiques, notamment une réduction de la croissance, en particulier dans les pays en développement

Aucune estimation globale, précise et fiable du coût des impacts du changement climatique déjà observés n'est donnée dans le rapport, car ni la méthodologie ni les données nécessaires pour établir une telle estimation ne sont encore disponibles.

Attribution des impacts observés au changement climatique

Une avancée notable de ce nouveau rapport est de montrer les progrès récents faits pour attribuer ou non les impacts observés au changement climatique. Le sujet est en effet difficile à aborder sur le plan scientifique, car les catastrophes météorologiques et climatiques ont toujours existé présentant une variabilité temporelle souvent très forte, en particulier pour les événements extrêmes. Il faut donc non seulement identifier statistiquement les tendances qui émergent de la variabilité naturelle, mais aussi prouver, par des méthodologies adaptées, que ce sont bien certains aspects du changement climatique qui sont la cause de ces catastrophes.

Il est également nécessaire de pouvoir filtrer les effets liés à l'augmentation de la vulnérabilité, laquelle est associée, par exemple, à l'accroissement de la population dans de nombreuses régions.

Les auteurs du rapport, s'appuyant sur plus de 70 000 études, ont tout d'abord montré que la quasi-totalité des régions étaient couvertes par une ou plusieurs études attribuant au moins un impact les affectant au changement climatique (voir la Figure 1.1 du chapitre 1 du rapport). Il reste néanmoins beaucoup de régions du monde, en particulier en Afrique, en Sibérie et sur le sous-continent indien, où de telles études sont encore trop rares.

Le résumé à l'intention des décideurs (RID) du rapport présente dans sa Figure 2 une liste, par région, d'impacts négatifs sur les écosystèmes et sur les systèmes humains qui ont pu être attribués au changement climatique, en associant à chacun d'eux un degré de confiance. Cette figure montre que toutes les régions du monde sont touchées par au moins un type d'impacts attribués au changement climatique et affectant à la fois les écosystèmes et les systèmes humains, à l'exception de la région classée « Australasie » pour laquelle l'attribution n'est démontrée que pour les écosystèmes.

Les impacts futurs du changement climatique dans le monde

Connaître le plus précisément possible les impacts futurs du changement climatique est essentiel : d'une part, pour convaincre encore plus les nations et les sociétés de la nécessité de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et éviter ainsi le pire et, d'autre part, pour nous adapter le mieux possible à la part du changement climatique que nous n'aurons pas pu éviter.

Le niveau à venir du réchauffement planétaire est le principal déterminant des impacts futurs

L'identification et si possible la quantification des impacts futurs du changement climatique font l'objet d'intenses recherches portant sur la quasi-totalité des secteurs potentiellement concernés. Le rapport du GT2 synthétise au mieux les connaissances scientifiques produites dans ce domaine au cours des sept dernières années.

Pour cela, ses auteurs se sont appuyés dans un premier temps sur le rapport du GT1 (IPCC, 2021) qui a montré que les répartitions géographiques des projections de trois variables climatiques clés (température, précipitations, humidité des sols) au regard des impacts, présentaient toutes une allure très similaire, et ce quel que soit le niveau de réchauffement planétaire projeté à partir des différents scénarios socio-économiques sur lesquels s'appuient les modèles de climat pour déterminer les conditions climatiques futures (voir la Figure 5 du RID du rapport du GT1).

Cette caractéristique permet de simplifier énormément la façon de s'interroger sur les impacts futurs possibles du changement climatique. En effet, au lieu de poser la question : « quels seront les impacts dans la région x, en année N, si l'humanité suit le scénario socio-économique RCP ou SSP y ? », on peut, en première approximation et pour de nombreux types d'impacts, se poser la question plus simple suivante : « quels seront les impacts dans la région x, si le réchauffement mondial atteint z°C ? ».

Cette nouvelle façon de décrire les impacts futurs permet également de faire un lien direct avec les objectifs de température mondiale définis dans l'Accord de Paris. Cela permet aussi à chacun des acteurs, qu'il soit décideur politique, décideur économique ou simple citoyen, de traduire rapidement les conséquences en termes d'impacts climatiques de résultats scientifiques tels que : « Les trajectoires qui tiennent compte des mesures annoncées par les pays en matière d'atténuation jusqu'en 2030 sont dans l'ensemble compatibles avec les trajectoires à moindres coûts qui prévoient un réchauffement planétaire d'environ 3°C en 2100, ce réchauffement se poursuivant ensuite » (GIEC, 2018).

Une avancée du rapport du GT1 vient également de l'identification de 35 « facteurs climatiques générateurs d'impacts » (CID) (voir la Figure 9 du RID du GT1). Les CID sont des variables décrivant des conditions physiques du système climatique qui ont une incidence sur

un élément de la société ou des écosystèmes. Les CID permettent de faire le pont plus efficacement entre les résultats du GT2 et ceux du GT1, notamment via l'utilisation d'un atlas interactif (interactive-atlas.ipcc.ch), qui permet notamment de produire des cartes mondiales montrant l'évolution de ces CID en fonction du niveau futur de réchauffement planétaire.

Cette approche simplifiée peut néanmoins être réductrice dans certains cas, car elle ne prend pas en compte l'évolution de l'exposition et de la vulnérabilité des populations. C'est pourquoi certaines projections des impacts précisent également à quel scénario socio-économique elles se rattachent.

Le rapport du GT2 présente de nombreux résultats, souvent quantitatifs, sur les impacts futurs sur les systèmes naturels et humains. Les impacts futurs sont décrits aussi bien dans les chapitres sectoriels que dans ceux régionaux. Le résumé technique rassemble quelques cartes présentant des risques emblématiques, tels que la perte de biodiversité terrestre et marine ou encore la population soumise à des seuils mortels de température ou à des submersions marines centennales. Ces mêmes chapitres présentent également des cartes restituant les projections de nombreux impacts, par exemple ceux sur la culture de différentes espèces végétales essentielles pour la sécurité alimentaire ou bien ceux sur la mortalité de différentes espèces d'animaux d'élevage. On trouve également dans ce rapport une carte du monde identifiant le patrimoine culturel à risque.

Dans de nombreux cas, les impacts futurs sont de même nature que ceux déjà observés, mais ils seront d'autant plus intenses et étendus que le niveau de réchauffement planétaire sera élevé. Cela réaffirme un résultat fondamental du SR1.5, à savoir que chaque incrément de réchauffement planétaire compte.

L'importance des seuils de température en matière d'aggravation des impacts et au regard de leur irréversibilité potentielle

Pour s'adapter au mieux aux impacts du climat futur ou pour bien mesurer les conséquences d'une réduction insuffisante ou non assez rapide des émissions de gaz à effet de serre, il est très important d'identifier les seuils à partir desquels les risques encourus s'élèvent d'un niveau de gravité ou deviennent irréversibles.

Pour cela, le GT2 du GIEC a développé, depuis son 3^e rapport d'évaluation, les concepts de « burning embers » et de « reasons for concerns (RFC) » (en français, « braises ardentes » et « raisons de s'inquiéter »). Dans le rapport du GT2, l'utilisation de ces concepts a encore été étendue pour décrire l'élévation des niveaux de risque en fonction de la température planétaire pour différents écosystèmes terrestres et marins, pour plusieurs maladies et pour plusieurs systèmes régionaux ou sectoriels. Le traditionnel graphique montrant les cinq types de RFC a été mis à jour à partir des connaissances les plus récentes (voir la Figure 4 du RID du GT2), ce qui a conduit à abaisser les seuils de température associés au passage au niveau supérieur d'un niveau de risque donné. Cela signifie que les risques

à attendre pour un niveau de réchauffement donné s'avèrent plus élevés que ce qui était estimé dans les rapports précédents.

Enfin, le rapport identifie des seuils de réchauffement planétaire dont le franchissement pourrait conduire certains systèmes naturels à des changements irréversibles (disparition d'îles et de glaciers, extinction d'espèces et d'écosystèmes, etc.). Dans certains cas, par exemple pour les coraux tropicaux, ces changements irréversibles interviennent dès que le seuil de 1,5°C de réchauffement planétaire est franchi, ajoutant un argument supplémentaire pour faire en sorte que soit respecté l'objectif de limiter le réchauffement à cette valeur, comme rappelé en conclusions des travaux de la COP26.

Bibliographie

IPCC (2022), "Summary for Policymakers", In: "Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability", Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, PÖRTNER H. O., ROBERTS D. *et al.* (in Press).

PÖRTNER H. O., SCHOLLES R. J., AGARD J. *et al.* (2021), "IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change".

CRAMER W., GUIOT J., MARINI K. *et al.* (2020), "Climate and environmental change in the mediterranean basin-current situation and risks for the future. MedECC: First Mediterranean Assessment Report", UNEP/MAP, Marseille.

IPCC (2021), "Summary for Policymakers", In: "Climate Change 2021: The Physical Science Basis", Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, MASSON-DELMOTTE V., ZHAI P., PIRANI A., CONNORS S. L., PÉAN C., BERGER S., CAUD N., CHEN Y., GOLDFARB L., GOMIS M. I., HUANG M., LEITZELL K., LONNOY E., MATTHEWS J. B. R., MAYCOCK T. K., WATERFIELD T., YELEKÇİ O., YU R. & ZHOU B. (eds.), Cambridge University Press (In Press).

GIEC (2018), « Résumé à l'intention des décideurs – Réchauffement planétaire de 1,5°C. Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté », rapport publié sous la direction de MASSON-DELMOTTE V., ZHAI P., PÖRTNER H. O., ROBERTS D., SKEA J., SHUKLA P. R., PIRANI A., MOUFOUMA-OKIA W., PÉAN C., PIDCOCK R., CONNORS S., MATTHEWS J. B. R., CHEN Y., ZHOU X., GOMIS M. I., LONNOY E., MAYCOCK T., TIGNOR M. & WATERFIELD T., Organisation météorologique mondiale, Genève (Suisse), 32 pages.

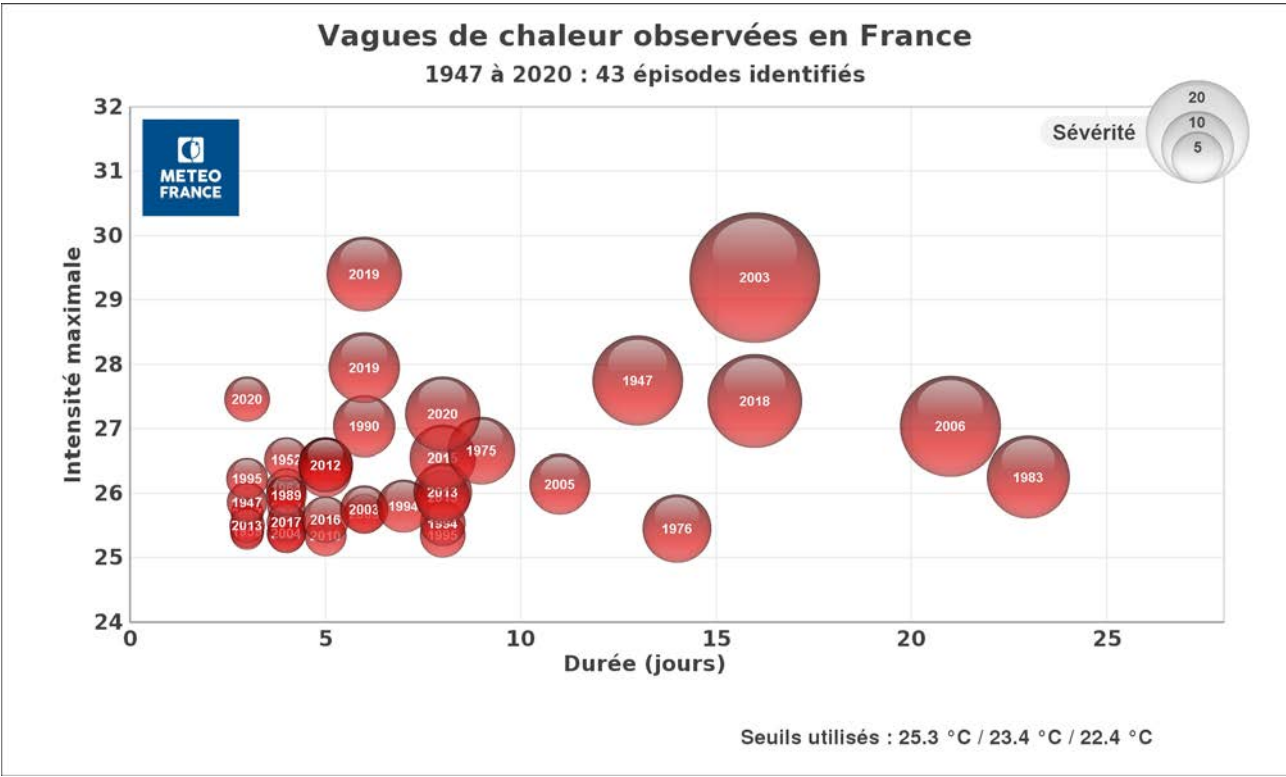


Figure 2 : Les vagues de chaleur en France depuis 1947 – Source : Météo-France.

RCP3.2.6, et d'environ 4,5°C, dans le scénario à fortes émissions RCP8.5, par rapport à la période de référence 1986-2005. Les changements prévus de la température moyenne annuelle sont similaires dans toutes les sous-régions européennes. Des variations plus importantes peuvent se produire localement et selon les saisons.

En France, la hausse de la température moyenne annuelle est du même ordre de grandeur que celle observée dans le reste de l'Europe. Les températures moyennes en France ont augmenté de 1,7°C depuis 1900. C'est plus que le réchauffement constaté en moyenne dans le monde, lequel est estimé à environ 1,1°C depuis 1850 selon le premier volume du 6^e rapport d'évaluation. Le réchauffement est comparable d'une région française à l'autre, avec une augmentation supérieure dans les parties les plus continentales ou dans les zones de montagne.

Le réchauffement planétaire s'accompagne de vagues de chaleur qui font partie des extrêmes climatiques les plus préoccupants au regard de la vulnérabilité de nos sociétés et de l'évolution attendue de leur fréquence et de leur intensité. En France, à la fin de ce siècle, elles

pourraient être non seulement bien plus fréquentes qu'aujourd'hui, mais aussi beaucoup plus sévères et bien plus longues, avec une période d'occurrence étendue allant de la fin mai jusqu'au début du mois d'octobre. La canicule exceptionnelle de 2003 (voir la Figure 2 ci-dessus) pourrait ainsi devenir la normale dans les prochaines décennies.

Température et vagues de froid

Le nombre de jours de gel en Europe a diminué depuis les années 1980, mais avec une variabilité considérable d'une année sur l'autre. La diminution absolue la plus rapide a été observée en Europe du Nord. Cette tendance devrait se poursuivre tout au long du XXI^e siècle. Ainsi, le nombre de jours de gel devrait diminuer de moitié environ au cours du XXI^e siècle dans le cadre du scénario à fortes émissions RCP8.5.

Cependant, malgré une diminution globale du nombre de jours de gel, le risque de dommages causés par le gel auquel sont confrontés les producteurs de fruits et légumes pourrait augmenter en raison du début plus précoce de la période de végétation.

En France, et plus particulièrement en métropole, le réchauffement climatique global tend à diminuer l'intensité des épisodes froids. Cependant, le diagnostic sur l'évolution observée des vagues de froid n'est pas symétrique à celui des vagues de chaleur. Ainsi, les vagues de froid recensées depuis 1947 à l'échelle nationale ont été légèrement moins nombreuses au cours des trente-quatre dernières années que sur la période antérieure, mais surtout elles ont été moins

³ Le sixième rapport d'évaluation du GIEC (AR6) utilise principalement les scénarios « SSP » (Shared Socio-economic Pathway – Trajectoires socio-économiques partagées). Les quatre trajectoires de forçage radiatif (RCP) peuvent résulter de différentes combinaisons d'évolutions économiques, technologiques et démographiques, et de politiques environnementales, qui sont explorées par les « SSP ». Il y a une correspondance assez directe entre les RCP et les SSP : https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf

intenses. De même, si les quatre vagues de froid les plus longues et les plus intenses (février 1956, janvier 1963, janvier 1985 et janvier 1987) ont été observées il y a plus de vingt-cinq ans, ce type d'événements reste bien présent dans notre climat de ce début de siècle, comme en témoigne l'épisode de février 2012 ou, très récemment, les gelées tardives⁴ qui ont touché la France après un pic de douceur remarquable à la fin mars 2021.

Sécheresses

Les précipitations annuelles ont augmenté dans le nord de l'Europe et diminué dans le sud, sans qu'aucune tendance ne soit discernable en Europe centrale ; ces tendances devraient se poursuivre à l'avenir. Cependant, il convient de noter que les pluies d'été – si vitales pour les écosystèmes naturels et l'agriculture – montrent des signes de diminution en Europe centrale et méridionale ; aucun changement n'étant en revanche prévu pour l'Europe du Nord. Cette diminution, additionnée à l'augmentation de l'évapotranspiration due aux températures plus chaudes, ne va qu'accroître la sécheresse des sols.

En France, l'évolution des précipitations est contrastée selon les régions et les saisons. Ainsi, sur la période 1959-2009, les précipitations annuelles sont en hausse dans la moitié nord, alors qu'elles sont en baisse dans la moitié sud. Au printemps et en automne, les cumuls sont en hausse sur la majeure partie du territoire métropolitain. Une baisse des cumuls est également observée dans les régions méridionales. Cependant, les tendances des précipitations sont souvent peu marquées et peuvent varier selon la période d'étude couverte par l'analyse.

En France métropolitaine, les résultats du projet de recherche national ClimSec montrent une aggravation plus rapide et plus intense des sécheresses dues à une baisse de l'humidité des sols, laquelle est plus liée à l'évapotranspiration qu'à un déficit de précipitations. Les projections climatiques indiquent surtout que notre pays risque de connaître au cours de la seconde moitié du XXI^e siècle des sécheresses agricoles quasi continues et de grande intensité, un aléa climatique totalement inconnu dans le climat actuel.

Ainsi, la sécheresse météorologique extrême de 1976 représente un seuil qui serait dépassé à la fin de ce siècle, si l'on se réfère aux scénarios prévoyant les plus fortes émissions de gaz à effet de serre. Tandis que la sécheresse agricole extrême de 1990 constitue un seuil qui serait dépassé dès les années 2050.

Vent et tempêtes

Le sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2021) estime, avec un degré de confiance moyen, que la fréquence et l'intensité des tempêtes, y compris les vents forts et les tempêtes extratropicales, devraient

augmenter en Europe septentrionale et centrale. Pour l'Europe du Sud, comme pour l'Europe méridionale l'intensité des tempêtes devrait augmenter, tandis que leur fréquence devrait diminuer.

Cependant, les données limitées et les difficultés de modélisation rendent les projections relatives aux vents extrêmes plus incertaines que celles concernant les autres risques climatiques.

Cette forte incertitude aux échelles mondiale et européenne se confirme à l'échelle de la France métropolitaine, puisque les études actuelles ne permettent pas de mettre en évidence une tendance future notable au regard de l'évolution du risque de vent violent lié aux tempêtes. Les projections ne montrent en effet aucune tendance significative de long terme sur la fréquence et l'intensité des tempêtes, que ce soit à l'horizon 2050 ou à l'horizon 2100. Une étude récente des tempêtes de janvier 2018 (notamment Eleanor qui a touché la France) a confirmé que les tendances à la survenue de telles tempêtes étaient très faibles et que les activités humaines ont eu très peu d'influence.

Précipitations intenses et inondations

Plusieurs indicateurs de l'AEE⁵ montrent une augmentation considérable des précipitations intenses en Europe du Nord, mais qui serait plus faible en Europe centrale, tandis qu'aucun changement significatif ne serait observé en Europe du Sud, et ce tant pour le passé que pour le futur.

En conséquence, les crues des cours d'eau devraient augmenter dans la plupart des pays d'Europe. Les changements attendus dans le sud de l'Europe sont plus variés et incertains, avec des diminutions prévues pour certaines régions mais des augmentations dans de nombreuses autres, y compris des régions où les précipitations globales pourraient diminuer.

Bien que les événements de type précipitations intenses soient difficiles à reproduire par les modèles de climat actuels, une tendance à la hausse est projetée sur l'ensemble de la France. Or, de tels événements déversant de l'ordre de 100 mm d'eau par jour génèrent des inondations, principalement dans les zones imperméabilisées.

Un cas particulier est celui des événements dits « cévenols », qui impactent le sud méditerranéen de la France principalement en automne, et ce quasiment tous les ans. Ces épisodes sont non seulement intenses, mais aussi souvent étendus spatialement, et génèrent des crues rapides souvent dévastatrices. L'ensemble des études menées s'accordent sur une augmentation de l'intensité de ces précipitations extrêmes sous l'effet du changement climatique, avec, en outre, une extension des zones impactées au-delà des régions habituellement touchées, notamment vers le Sud-Est ou les Pyrénées. Le risque associé à ces crues rapides

⁴ <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/climat/changement-climatique-quoi-ressembleront-les-hivers-parisiens>

⁵ https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/publications/climate-related-hazard-indices-for-europe-etc-cca-technical-paper-1-2020/etc-cca_technical_paper_1_2020_final.pdf#page=40

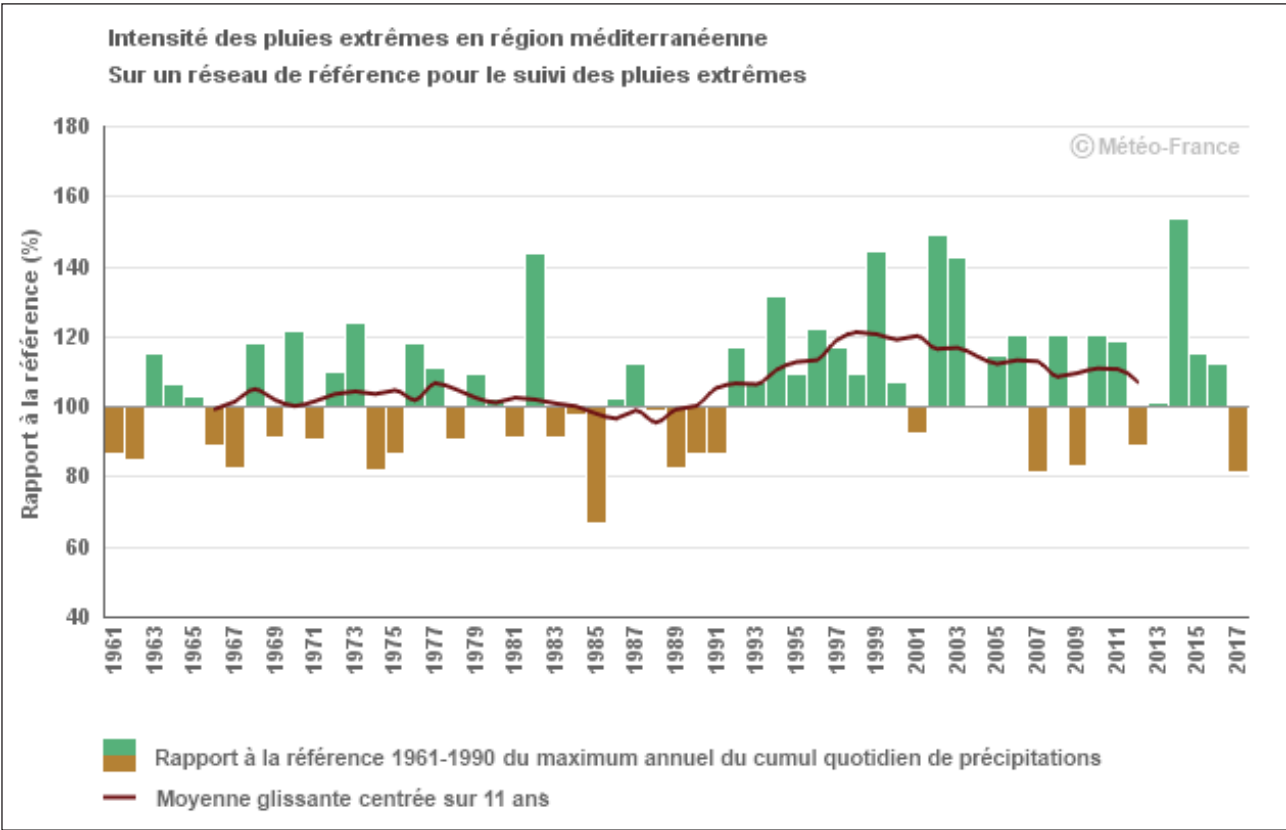


Figure 3 : Intensité des pluies extrêmes en région méditerranéenne – Source : Météo-France.

« cévenoles » augmente donc avec le changement climatique (voir la Figure 3 ci-dessus).

Neige et glace

Selon le GIEC (GIEC, 2021), la couverture neigeuse dans les Alpes diminuera en dessous de 1 500-2 000 m d'altitude tout au long du XXI^e siècle. Une réduction du volume de glace des glaciers est prévue dans les Alpes européennes et en Scandinavie.

Les chutes de neige annuelles et l'étendue de la couverture neigeuse ont généralement diminué en Europe, en particulier à faible altitude. Les chutes de neige devraient diminuer considérablement à l'avenir en Europe centrale et méridionale, où elles pourraient presque disparaître dans de nombreuses régions de faible altitude. En Europe du Nord, l'évolution des chutes de neige dépend de l'équilibre entre la quantité globale de précipitations, qui devrait augmenter,

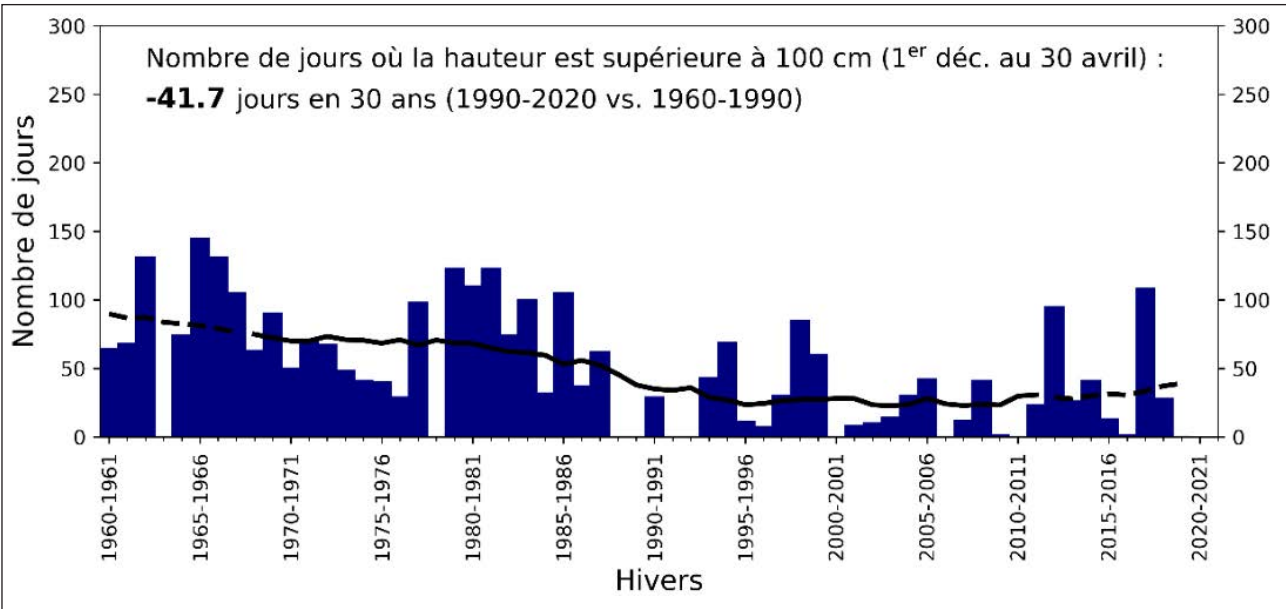


Figure 4 : Enneigement au Col de Porte : valeurs annuelles et moyenne glissante sur 15 ans – Source : Météo-France.

et la proportion de précipitations tombant sous forme de neige, qui devrait diminuer, en particulier à basse altitude et dans le cadre des scénarios d'émissions les plus élevées. Les saisons de neige sont généralement devenues plus courtes en Europe du Nord, de l'Ouest et de l'Est en raison d'une fonte des neiges plus précoce au printemps. La durée de la saison des neiges devrait diminuer considérablement à l'avenir, avec des réductions dépassant les 100 jours d'ici la fin du siècle dans certaines régions. Dans le sud de l'Europe, les chutes de neige pourraient ainsi presque disparaître d'ici la fin du XXI^e siècle à basse altitude.

En France et en zone de moyenne montagne, les effets du réchauffement climatique sont nettement visibles avec une limite pluie-neige qui remonte progressivement. Les baisses de la durée d'enneigement sont de plusieurs jours par décennie en ce qui concerne la présence de la neige au sol, et ces baisses sont d'ampleur bien supérieure si l'on prend en considération les hauteurs de neige supérieures à 1 mètre (- 41,7 jours en trente ans au Col de Porte, voir la Figure 4 de la page précédente). La diminution de la durée d'enneigement n'est pas encore observée à une altitude plus élevée.

Littoral et submersions

À l'échelle mondiale, le niveau moyen des mers – la hauteur de l'eau de mer par rapport à la terre – augmente depuis plus d'un siècle, de façon accélérée au cours des dernières décennies en raison du réchauffement des océans et de la fonte des glaciers et des calottes glaciaires.

De même, en Europe, la plupart des régions côtières ont connu une augmentation du niveau relatif de la mer mesuré par les marégraphes, mais avec des différences

régionales importantes, comme le long de la côte nord de la mer Baltique et, dans une moindre mesure, de la côte nord de l'Atlantique, où le niveau des terres continue de s'élever en raison du rebond postglaciaire.

Le niveau des mers continuera à augmenter tout au long de ce siècle, et ce quel que soit le scénario d'émissions.

Sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer, les changements prévus en termes de fréquence et d'intensité des inondations côtières constituent une menace majeure pour les écosystèmes et la population des zones côtières de faible altitude en Europe du Nord et de l'Ouest. En raison de l'élévation relative du niveau de la mer prévue d'ici à 2100, des inondations côtières historiques d'occurrence centennale devraient se produire plusieurs fois par an le long des côtes de la Méditerranée et de la mer Noire et au moins une fois par an le long de la plupart des autres côtes européennes dans le cadre d'un scénario à fortes émissions (voie de concentration représentative RCP8.5), une fréquence ramenée à au moins une fois par décennie dans le cadre des scénarios à faibles émissions.

Les chiffres représentatifs de la variation globale du niveau des océans masquent une forte disparité régionale (voir la Figure 5 ci-dessous).

Sur la période 1993-2021, la hausse moyenne du niveau des mers est estimée à 3,5 mm par an. Un zoom sur la France métropolitaine permettrait de faire le constat que le long des côtes de la métropole (l'Atlantique et la Méditerranée), le niveau de la mer s'est élevé à un rythme légèrement inférieur à la moyenne globale.

Concernant les Outre-mer, la même disparité des situations est observable (ONERC, 2015).

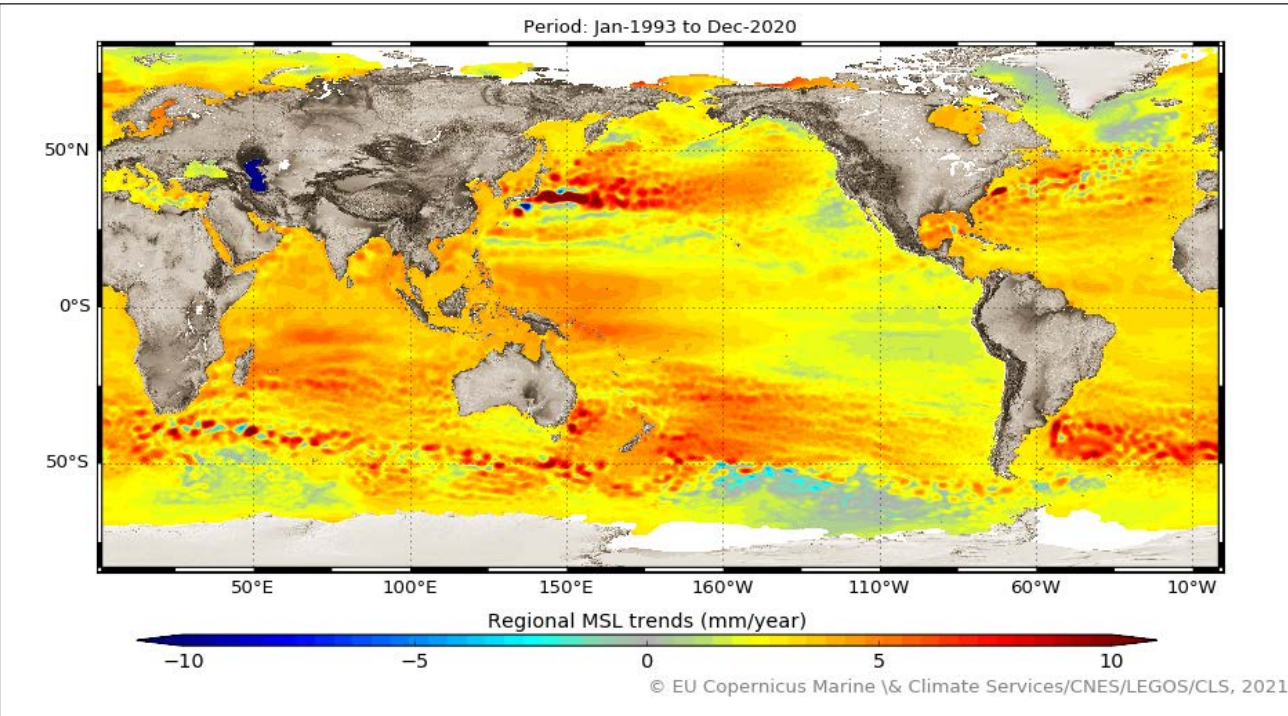


Figure 5 : Tendence de la hausse du niveau global des mers (en mm/an) – Source : Copernicus ; CNES/LEGOS.

Mers et océans

Les océans de la planète se réchauffent, ce qui a de nombreuses implications sur les espèces marines et la biodiversité, et s'accompagne de répercussions directes et indirectes sur les activités naturelles et humaines, allant des services écosystémiques jusqu'à l'industrie de la pêche.

La température annuelle moyenne à la surface de la mer a augmenté dans toutes les mers régionales européennes. Le réchauffement des océans devrait se poursuivre à l'avenir et pourrait dépasser 3°C d'ici la fin du siècle dans le cadre d'un scénario à fortes émissions.

Les augmentations les plus importantes devraient concerner l'océan Arctique, la mer du Nord et la mer Méditerranée, tandis que des augmentations plus faibles de la température de surface moyenne (TSM) sont prévues pour l'océan Atlantique.

Les vagues de chaleur ne se limitent pas aux zones terrestres. En raison du réchauffement de la température moyenne à la surface des océans, les vagues de chaleur marines sont devenues plus fréquentes dans le monde et dans les mers européennes au cours du siècle dernier, entraînant une augmentation considérable de la durée totale des vagues de chaleur marines, en particulier en mer Méditerranée. La fréquence, l'ampleur et la durée des vagues de chaleur marines devraient encore s'accroître. Dans le cadre du scénario à fortes émissions RCP8.5, la durée des vagues de chaleur marines devrait être multipliée par au moins 20 le long du littoral européen ; l'augmentation devrait être beaucoup plus faible dans le cadre d'un scénario à faibles émissions (GIEC, 2018).

Conclusion

Selon le type d'aléa et la zone considérés, le changement climatique se traduit par une recrudescence des événements extrêmes ou des impacts accrus, en termes de risques pour les populations et les activités économiques exposées, en termes de santé et de fragilisation des écosystèmes.

En dépit des quelques incertitudes qui subsistent pour certains aléas dans le futur, les impacts grandissants du changement climatique dans le monde, et en particulier en Europe et en France, peuvent être limités par une adaptation organisée et réfléchie, voire, dans certains cas, être transformés en opportunités.

Bibliographie

GIEC (2018), « Rapport spécial sur les océans et la cryosphère dans un monde dont le climat change ».

ONERC (2013), « Les Outre-mer face au défi du changement climatique », rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris.

ONERC (2014), « L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change », rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris.

ONERC (2015), « Le littoral dans le contexte du changement climatique », rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris.

ONERC (2018), « Les événements météorologiques extrêmes dans le contexte du changement climatique », rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris.

Quel climat en France en 2050 et 2100 ?

Par Virginie SCHWARZ

Présidente-directrice générale de Météo-France

Et Jean-Michel SOUBEYROUX

Directeur adjoint scientifique de la direction de la Climatologie et des Services climatiques de Météo-France

La France n'est pas épargnée par l'ampleur du changement climatique constaté et à venir. DRIAS2020, le nouveau jeu de projections climatiques mis à disposition par Météo-France, précise à l'échelle de la métropole les évolutions climatiques décrites dans les travaux du GIEC.

Jusqu'au milieu de ce siècle, l'évolution est peu dépendante des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, avec un réchauffement moyen de + 1,7°C ainsi que la multiplication d'événements extrêmes, tels que les vagues de chaleur ou les sécheresses des sols.

À l'horizon 2100, l'évolution, en revanche, dépend fortement des émissions de gaz à effet de serre, avec une climatologie de notre pays totalement bouleversée et des impacts majeurs sur l'ensemble de nos activités, si les émissions ne sont pas significativement réduites.

Ces projections rappellent l'urgence à agir pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Elles constituent également la base pour le développement par Météo-France de services climatiques qui apportent aux différents secteurs d'activité des aides à la décision pour leur permettre de s'adapter à des évolutions déjà inéluctables.

Le sixième rapport du GIEC sur les bases physiques du changement climatique publié au mois d'août 2021 a réaffirmé le constat alarmant fait de ce changement à l'échelle planétaire : « les changements climatiques récents sont généralisés et rapides, et s'intensifient. Ils sont sans précédent depuis des milliers d'années ». Le réchauffement global atteint + 1,1°C depuis l'ère préindustrielle et même + 1,6°C sur l'ensemble des zones continentales. Le seuil de réchauffement de + 1,5°C devrait être dépassé au cours des quinze prochaines années, et seules des réductions importantes et rapides de nos émissions de CO₂ pourraient permettre de rester en deçà du seuil des + 2°C.

La France n'est pas épargnée par ces évolutions : ainsi, l'intensité du réchauffement depuis le début du XX^e siècle est estimée à environ + 1,7°C à l'échelle nationale, voire même + 2,3°C pour la ville de Paris (rapport APC 2021). Ce réchauffement se traduit par des évolutions rapides de plusieurs composantes de notre climat (températures extrêmes, sécheresse des sols, moindre enneigement en montagne, pluies extrêmes...) affectant de nombreux écosystèmes et activités économiques. Ce constat mesurable et généralisé à l'échelle du territoire met en exergue l'urgence d'engager des actions d'adaptation dans de nombreux secteurs, tout

en poursuivant des efforts importants en matière de décarbonation de notre société.

Au niveau national, l'État a lancé, en fin d'année 2021, l'évaluation de son deuxième plan national d'adaptation publié en 2018, qui s'était appuyé notamment en termes de trajectoires climatiques sur les données du rapport de l'ONERC de 2014 sur le climat de la France au XXI^e siècle, des données disponibles sur le portail DRIAS^{lesfutursduclimat1}. Depuis cette période, de nouvelles projections climatiques ont été réalisées aux échelles européenne et nationale. Les contributeurs sont constitués d'une vingtaine de services météo nationaux et organismes de recherche, dont Météo-France. Cela a permis de construire un diagnostic ciblé sur la France et mis à disposition par Météo-France en février 2021, de façon à conserver une image de l'état de l'art : le jeu de données DRIAS-2020.

L'objet de cet article est de préciser le climat attendu en France en 2050 et en 2100 à la lumière de ce nouveau jeu de référence qu'est le DRIAS-2020.

¹ www.drias-climat.fr

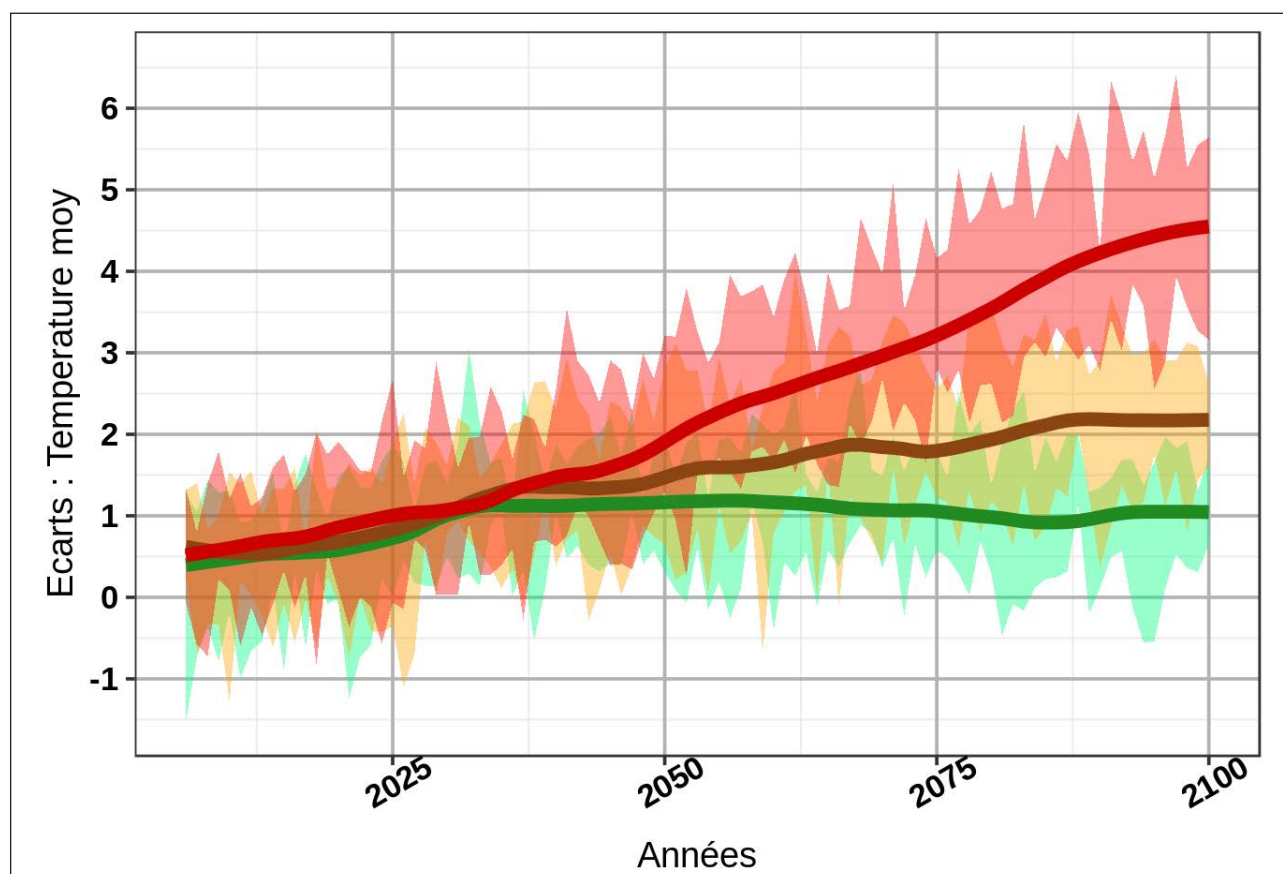


Figure 1 : Évolution projetée de l'anomalie de température moyenne en métropole jusqu'en 2100 pour différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre : RCP2.6 (en vert), RCP4.5 (en orange) et RCP8.5 (en rouge) – Source : Météo-France.

Le nouveau jeu de référence DRIAS-2020

La mise à jour des contenus du portail DRIAS a été menée entre 2018 et 2020 dans le cadre du projet « Convention Services climatiques »² soutenu par le ministère de la Transition écologique. Les projections DRIAS-2020 s'appuient sur un ensemble européen se composant d'une centaine de projections climatiques régionalisées. Trente simulations ont été sélectionnées de façon à représenter au mieux les différentes évolutions possibles du climat, tout en veillant à conserver un ensemble compact pouvant être raisonnablement utilisé pour mener des études d'impact en aval.

Les différentes simulations, proposées dans une résolution de 8 km x 8 km, sont disponibles selon trois scénarios d'émissions de gaz à effet de serre sélectionnés par le GIEC : RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5. Parmi les scénarios dits RCP (Representative Concentration Pathways), le RCP2.6 décrit un monde très sobre en émissions de gaz à effet de serre, dans lequel le réchauffement global reste inférieur à 2°C par rapport aux températures préindustrielles (objectif des Accords de Paris). Le RCP8.5 décrit, quant à lui, un futur sans régulation des émissions, qui nous mènerait à un

réchauffement global d'environ 5°C d'ici la fin de ce siècle. Le scénario RCP4.5 décrit, pour sa part, une voie intermédiaire, dans laquelle les émissions continuent de croître pendant quelques décennies, avant de se stabiliser puis de décroître avant la fin du XXI^e siècle.

L'ensemble des données du jeu DRIAS-2020 sont en accès libre et gratuit sur le portail DRIAS. En outre, de nombreuses cartes peuvent être produites à façon dans l'espace Découverte de l'application.

Le climat de la France en 2050

Jusqu'en 2040, l'évolution différenciée des émissions de gaz à effet de serre des différents scénarios climatiques définis par le GIEC a peu d'impact sur l'évolution du climat. Mais cela change légèrement à l'horizon 2050. Nous avons donc fait le choix dans cet article de nous positionner à cet horizon pour présenter au lecteur le futur climat tel que défini par le scénario médian RCP4.5, lequel est aligné sur les engagements actuels (NDC) des différents pays ayant participé à la COP26. La Figure 1 ci-dessus illustre la similitude jusqu'au milieu de ce siècle des évolutions de la température moyenne annuelle en métropole correspondant aux trois scénarios d'émissions : on observe ainsi que les courbes correspondant aux trois scénarios considérés sont relativement voisines jusqu'au milieu de ce siècle, avant de diverger par la suite.

² <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Théma%20-%20Dveloppeur%20les%20services%20climatiques.pdf>

C'est également le scénario RCP4.5 qui a été pris en considération par RTE lors de son étude prospective « Futurs énergétiques 2050 » en France.

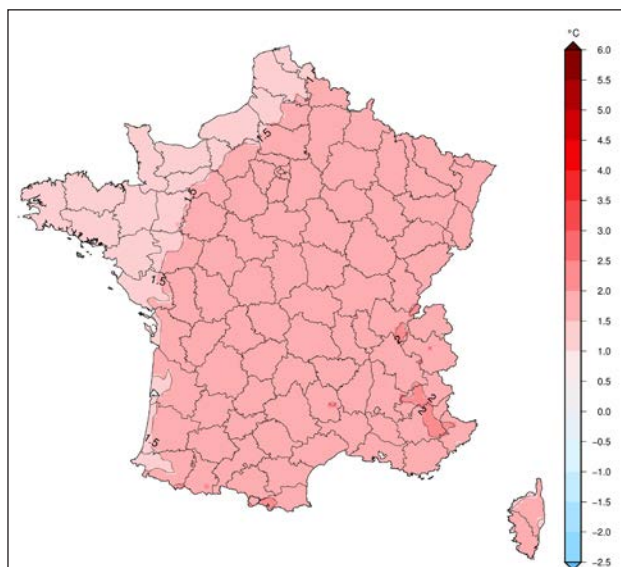


Figure 2a : Écart des températures moyennes annuelles à l'horizon 2050 (médiane de l'ensemble DRIAS-2020 sous scénario RCP4.5 (référence 1976-2005)) – Source : Météo-France.

Sur la base de ces hypothèses, le réchauffement climatique attendu à l'horizon 2050 est estimé à + 1,7°C en moyenne annuelle à l'échelle de la France (médiane des dix simulations de l'ensemble DRIAS-2020 par référence à 1976-2005³), avec des écarts allant de + 1°C en Bretagne à + 2,1°C sur le relief des Alpes et des Pyrénées (voir la Figure 2a ci-dessus). Il est à noter que cette valeur de réchauffement correspond à une augmentation de + 0,28°C par décennie, ce qui est assez proche des tendances observées depuis les années 1960. En termes d'analogie thermique, Lille aura alors le climat actuel de Poitiers, Nancy celui de Dijon et le centre de Paris celui d'Agen.

Ce réchauffement correspond à une modulation saisonnière présentant une hausse plus forte l'été (+ 2,1°C) et une accentuation des événements liés aux températures élevées, comme les vagues de chaleur, les journées de canicule ou les nuits tropicales (température nocturne supérieure à 20°C). La Figure 2b ci-contre montre ainsi qu'à l'exception des zones de montagne et du littoral de la Manche, toute la France connaîtra alors fréquemment des nuits tropicales qui sont aujourd'hui réservées quasiment exclusivement au littoral méditerranéen. Ces nuits, qui présentent des impacts sanitaires potentiels importants pour les populations à risques, deviendront bien plus fréquentes à Paris et à Bordeaux (plus de 20 jours par an), voire seront la norme au cœur de l'été à Toulouse ou à Lyon (30 jours) et seront même quasi systématiques tout au long de l'été sur le littoral méditerranéen, de Perpignan jusqu'à Marseille et Nice (plus de 60 jours).

³ L'écart entre la référence 1976-2005 et la normale climatologique 1991-2020 est d'environ 0,6°C.

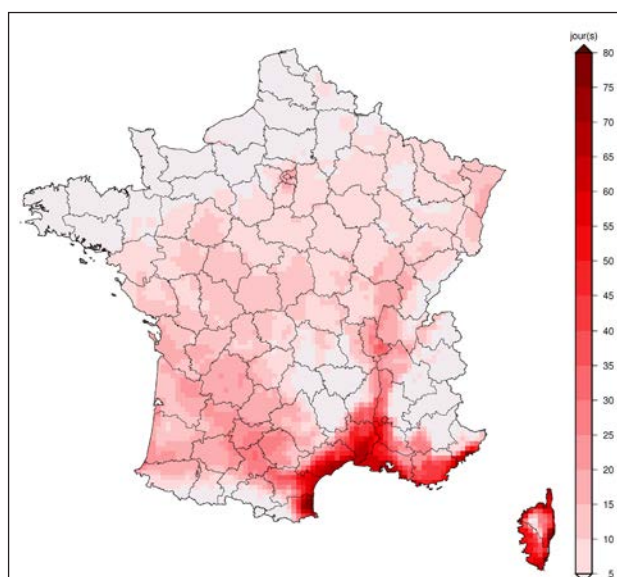


Figure 2b : Nombre annuel de nuits tropicales à l'horizon 2050 (médiane de l'ensemble DRIAS-2020 sous scénario RCP4.5) – Source : Météo-France.

En termes de cumul annuel de précipitations, les évolutions attendues sont relativement modestes (hausse de + 1,6 % sur la médiane de l'ensemble DRIAS-2020) et présentent une incertitude sur le signe de la tendance, certaines simulations se traduisant par une hausse supérieure à 7 % et d'autres par une baisse inférieure à 3 %. Les Figures 3a et 3b de la page suivante illustrent cette incertitude sur le signe de l'évolution du cumul annuel de précipitations, laquelle est particulièrement sensible dans le sud de la France, où les écarts possibles varient entre - 10 et - 15 % dans les simulations reposant sur les niveaux de précipitations les plus bas et + 10 et + 20 % dans les simulations à niveaux élevés.

Si le signe de l'évolution du cumul annuel est incertain, les projections climatiques s'accordent en revanche sur une modulation saisonnière avec plus de précipitations en hiver (+ 12 % pour la médiane de l'ensemble) et des pluies moindres en été (- 5 % pour la médiane). L'augmentation de l'intensité des pluies extrêmes, qui est de l'ordre de + 10 % en moyenne au niveau national, fait également consensus dans les projections climatiques à l'horizon 2050.

De nouvelles simulations hydrologiques réalisées par Météo-France dans le cadre du projet Explore 2 permettent de préciser l'évolution des composantes du bilan hydrique⁴, avec, en particulier, une hausse de l'évapotranspiration de l'ordre de + 10 %, laquelle se traduit par une augmentation de la sécheresse des sols en été (près de 25 jours). En montagne, la baisse du stock nival au printemps pourrait atteindre 40 % dans les Alpes du Nord et jusqu'à 60 % dans les Pyrénées. Ces premières simulations, qui seront prochainement complétées par d'autres modélisations hydrologiques, indiquent une évolution contrastée des débits tant au niveau géographique (tendance à la hausse dans la moitié nord et à la baisse dans la moitié sud) que saisonnier (hausse des débits en hiver et baisse des

⁴ <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/332>

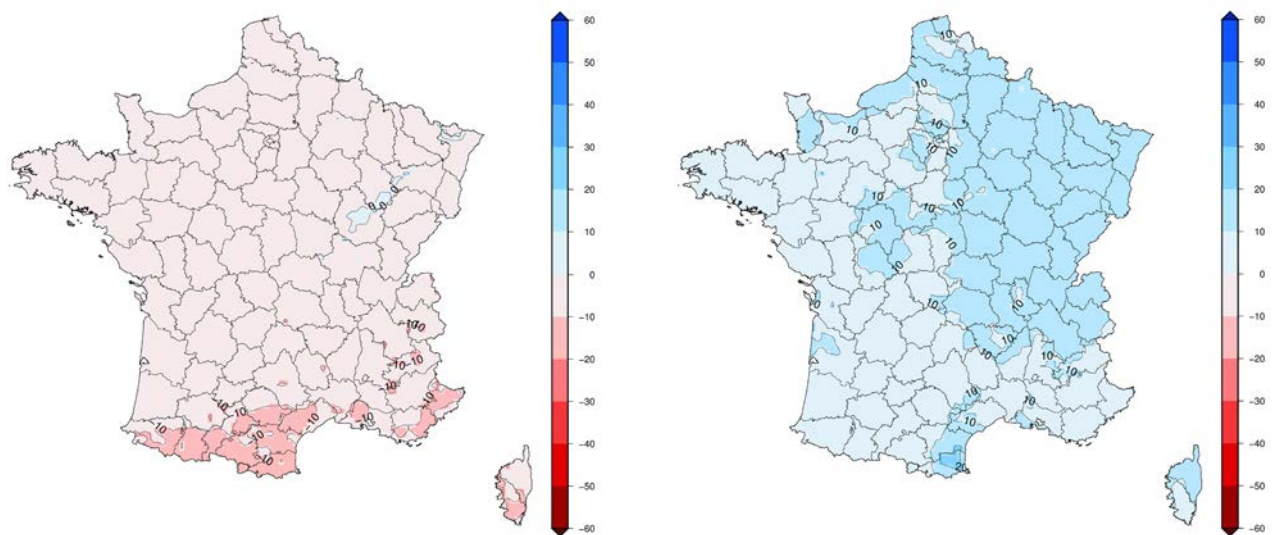


Figure 3 : Écart relatif (en %) du cumul annuel de précipitations à l'horizon 2050 sous scénario RCP4.5 (référence 1976-2005). Écart correspondant dans la carte de gauche au 5^e centile de l'ensemble DRIAS-2020 et dans la carte de droite au 95^e centile de ce même ensemble – Source : Météo-France.

débits d'étiage) ; une situation qui pourrait nécessiter la prise de mesures d'adaptation fortes dans la gestion de la ressource en eau en France pour la rendre plus résiliente face aux événements de crues et à ceux de sécheresse, dont la fréquence et l'intensité devraient augmenter.

Les futurs possibles en 2100

À l'horizon 2100, le climat futur en France dépendra fortement des trajectoires climatiques suivies ; à ce niveau, les écarts entre les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre deviennent prépondérants par rapport aux autres sources d'incertitude. L'augmentation des températures moyennes annuelles se stabiliserait légèrement en dessous de + 1,5°C dans le scénario RCP2.6, mais pourrait atteindre + 2,1°C dans celui

RCP4.5 (médiane de l'ensemble DRIAS-2020), voire même + 3,9°C dans le scénario RCP8.5 (médiane de l'ensemble DRIAS-2020). La réalisation de ce dernier scénario pourrait bousculer totalement la climatologie de notre pays amenant le climat de Lille à s'inscrire dans les normes actuelles de Perpignan. La question de la hausse des températures estivales suscite encore plus d'inquiétudes avec une hausse maintenue sous + 1,5°C dans le scénario RCP2.6, mais atteignant + 2,2°C dans le scénario RCP4.5 et + 4,5°C dans le scénario RCP8.5. L'incertitude sur l'évolution des précipitations en fin de siècle perdure quel que soit le scénario climatique pris en compte, tandis que les variations saisonnières entre l'hiver et l'été sont exacerbées dans le scénario RCP8.5 (+ 20 % en hiver et - 22 % en été) conduisant à une hydrologie dominée par des situations extrêmes en termes d'humidité ou, au contraire, de sécheresse.

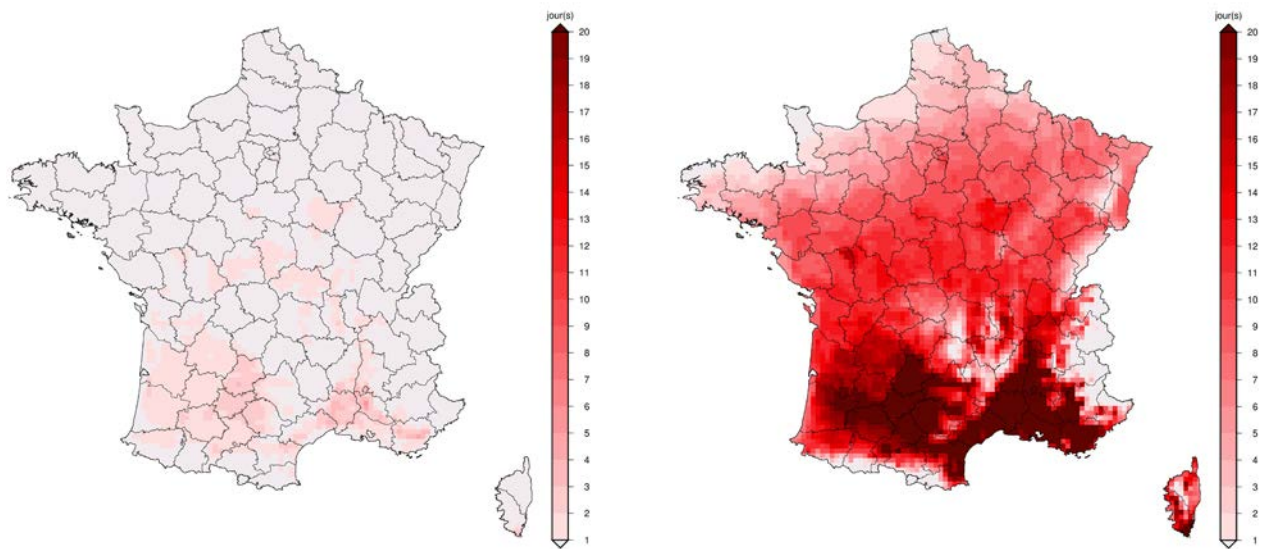


Figure 4 : Nombre de journées de forte chaleur (température maximale supérieure à 35°C) sur la période de référence 1976-2005 (carte de gauche) et à un horizon lointain (2071-2100) selon le scénario RCP8.5 (carte de droite) – Source : Météo-France.

Au-delà de ces évolutions à l'échelle de l'année ou des saisons, c'est l'évolution des phénomènes extrêmes qui pourrait constituer l'élément le plus impactant.

L'évolution déjà amorcée pour les extrêmes de température se poursuivra en deuxième moitié de siècle, avec une amplitude qui dépendra fortement de la trajectoire des émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, le nombre de jours de forte chaleur (température maximale supérieure à 35°C), qui ne progresserait que faiblement (quelques jours) dans le scénario RCP2.6, augmenterait de 15 à 20 jours dans Sud-Ouest et jusqu'à 35 à 40 jours dans le Sud-Est dans le scénario à fortes émissions qu'est le RCP8.5 (voir la Figure 4 de la page précédente).

Sans surprise, la tendance est exactement inverse pour les extrêmes froids. Les températures minimales les plus froides (10^e centile) augmenteront, mais dans des proportions très différentes selon les scénarios. Ces températures remonteraient de 0,5°C à 1°C dans le scénario RCP2.6, de 2°C à 2,5°C dans le scénario RCP4.5 et de 3,5°C à 4°C dans le scénario RCP8.5 (voir la Figure 5 ci-dessous). Cette évolution s'accompagne bien sûr d'une forte diminution du nombre de jours de gel.

niveau actuel dans le cas du scénario RCP2.6, mais une augmentation de près d'un mois dans le scénario RCP4.5 (hausse de 50 %) et même jusqu'à deux mois dans celui du RCP8.5 (hausse de 100 %).

Perspectives en matière d'atténuation et d'adaptation

Le nouveau jeu de référence DRIAS-2020 permet de décrire assez précisément les évolutions possibles du climat en France aux horizons 2050 et 2100 pour les paramètres liés aux températures, aux précipitations, et même au vent ou à l'humidité de l'air (deux paramètres non évoqués dans cet article).

Pour autant, ces évolutions pour pouvoir être traduites par les décideurs en termes de mesures d'adaptation doivent encore d'être retravaillées pour représenter les impacts sectoriels dans les domaines de l'énergie, de la gestion de la ressource en eau, des pratiques agricoles, du tourisme... Les modélisations hydrologiques du projet Explore 2 sont une première étape dans cette optique : en effet, elles permettent de décrire les futurs de la ressource en eau en amont de nombreux usages

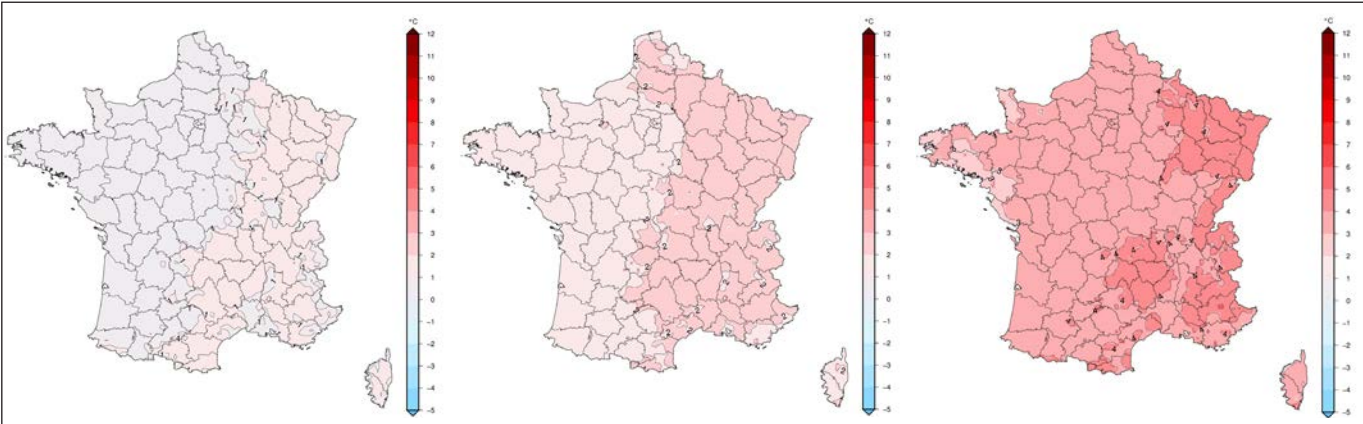


Figure 5 : Évolution des extrêmes froids de température minimale entre 1976-2005 et 2071-2100, dans le scénario RCP2.6 (carte de gauche), dans le scénario RCP4.5 (carte au centre) et dans le scénario RCP8.5 (carte à droite) – Source : Météo-France.

Les extrêmes de précipitations vont également se renforcer. On s'attend à une augmentation de l'intensité des précipitations les plus fortes (99^e centile des cumuls quotidiens), et ce dans tous les scénarios. Dans le scénario le plus défavorable, cette hausse pourrait atteindre 15 à 20 %. Il convient cependant de souligner deux éléments qui peuvent appeler à une certaine prudence au regard de ces résultats. Tout d'abord, l'indicateur utilisé met en évidence des niveaux de pluies quotidiennes (de l'ordre de 30 à 60 mm) observés en moyenne trois jours par an. Il n'est donc pas forcément représentatif des intensités rencontrées, par exemple dans les épisodes méditerranéens. Par ailleurs, pour ce paramètre, l'incertitude est plus liée aux modèles climatiques qu'au scénario RCP considéré.

L'aggravation de la sécheresse des sols est aussi un élément-clé du climat de la France de 2100 avec une stabilité du nombre annuel de jours de sol sec au

de l'eau potable, que ce soit en matière d'agriculture, d'hydroélectricité, de navigation fluviale, de tourisme, et sans oublier, bien sûr, la préservation des milieux naturels. Des outils de modélisation des systèmes anthropisés, comme la gestion de la neige dans les stations de ski, permettent de constituer de véritables aides à la décision en matière d'adaptation (service ClimSnow), tandis que les solutions fondées sur la nature viennent compléter cette palette d'outils.

Mais les projections à horizon 2100 et les évolutions décrites par le scénario RCP8.5 rappellent l'urgence à agir pour arriver à une réduction rapide et forte de nos émissions de gaz à effet de serre au niveau planétaire, et donc à l'échelle nationale. L'atteinte rapide de la neutralité carbone après 2050 ne relève plus d'un choix politique parmi d'autres, mais bien d'une nécessité, celle de préserver le fonctionnement de nos sociétés et de leur capacité d'adaptation.

Repenser l'eau à l'ère du changement climatique

Par Denis SALLES

ETTIS Inrae

« Se préparer à vivre dans un monde différent », voilà ce à quoi semble nous astreindre le changement climatique. Le refus de céder au fatalisme de la collapsologie, tout comme aux désillusions de trente ans de promesses du développement durable, nous condamne à l'optimisme. « De l'eau pour la qualité de vie » plutôt que « de l'eau pour les usages », tel est le basculement en cours pour passer du référentiel extractiviste de l'eau, qui prévaut depuis l'ère industrielle, à une conception de l'eau comme « matrice » du vivant. Cette contribution explore les dimensions cognitives, les conflits d'intérêts, les visions du monde ainsi que les démarches de sciences de l'anticipation (scénarios, trajectoires) qui sont à même d'accélérer la transition sociale-écologique vers des futurs de l'eau souhaitables et justes.

« L'avenir n'est pas ce qui va arriver, c'est ce que nous allons faire », H. Bergson.

Introduction

« Se préparer à vivre dans un monde différent », telle est l'une des conclusions du rapport AcclimaTerra 2018 sur le changement climatique en Nouvelle-Aquitaine (Le Treut, 2018). Cet énoncé anodin est en réalité lourd de sens. Il questionne, sur la base de preuves scientifiques de plus en plus tangibles des impacts du changement climatique, les capacités du vivant et des sociétés humaines à s'adapter aux effets inéluctables de ce changement à court et moyen terme. Aborder la question de l'adaptation au changement climatique au prisme de l'eau signifie focaliser son attention sur un enjeu sociétal majeur (plus médiatique que l'air ou les sols), sur un champ scientifique bien documenté et sur un domaine, la gestion de l'eau, historiquement très institutionnalisé et régulé. Après avoir caractérisé les changements hydroclimatiques dans le sud-ouest de la France et dressé un rapide panorama des stratégies d'adaptation développées dans les politiques de l'eau, cette contribution analyse l'évolution des référentiels, des conceptions de l'eau, des modes de gestion de celle-ci et des approches scientifiques pour relever le défi collectif du changement hydroclimatique. Cette contribution s'appuie sur des travaux de recherche et de prospective (Dupuy *et al.*, 2018 ; Labbouz *et al.*, 2017 ; de Godoy Leski *et al.*, 2015 ; Rulleau *et al.*, 2020 ; Salles *et al.*, 2017 ; Lhuissier *et al.*, 2016) et sur une analyse des politiques hydroclimatiques conduites par des organismes gestionnaires de l'eau dans le Sud-Ouest (PACC AG, 2018).

Sale temps pour l'eau

L'ensemble de l'Europe du Sud, et le sud-ouest de la France en particulier, connaît d'ores et déjà une accélération des modifications hydroclimatiques. Les estimations à l'horizon 2050 convergent pour prédire des tendances déjà largement engagées : une augmentation de la température de l'air de + 2°C ; un accroissement des situations extrêmes (crues, sécheresses) ; une baisse moyenne des débits naturels (sans soutien d'étiage) des cours d'eau entre - 20 % et - 50 % ; des situations d'étiage plus intenses et plus longues ; une baisse sensible de la réserve d'eau liée à un moindre enneigement des massifs montagneux. En association à ces évolutions climatiques, il est attendu : une hausse significative de l'évapotranspiration (+ 10 à + 30 %) et de l'assèchement des sols (facteur de sécheresse agricoles) ; une concentration des contaminants en lien avec la réduction des débits ; une augmentation continue et déjà observable de la température des eaux de surface (+ 1,5°C en quarante ans) ; un ralentissement de la durée de recharge des nappes souterraines (très variable selon les types d'aquifères) ; et une élévation du niveau des océans prévue entre 60 cm et 1 m en 2100 (PACC, 2018).

Ces évolutions hydroclimatiques majeures – qu'elles relèvent de transformations silencieuses ou d'événements extrêmes – ont des conséquences sur les activités socioéconomiques, la qualité de vie et la biodiversité. Le déséquilibre entre les consommations nécessaires à la satisfaction des besoins des activités et des milieux et les ressources disponibles va continuer de s'accroître sans intervention de changements sociétaux radicaux. Pour le bassin Adour-Garonne, ce déficit

est estimé à environ 1 milliard de mètres cubes en 2050 (PACC, 2018). Ces estimations, mêmes si elles sont discutables car calculées « à objectif environnemental et usages constants », augurent de fortes tensions entre usages, entre territoires et entre visions du monde, pour s'adapter à ces conditions hydroclimatiques. La « disponibilité de l'eau » constitue donc un des enjeux majeurs de la prochaine décennie pour les territoires du sud-ouest de la France (Dupuy *et al.*, 2018).

Des stratégies d'adaptation au changement climatique

Au vu de l'accélération des interdépendances entre le climat, l'eau, le vivant et la société, le problème public de l'eau change d'ampleur, de nature et de gouvernance. Les règles du partage de l'eau, héritées de la loi sur l'eau de 1964, ont été conçues en période d'abondance et deviennent dès lors inadaptées au contexte hydroclimatique du XXI^e siècle. Les politiques publiques et les gestionnaires de l'eau en ont-ils pris la mesure ?

Confrontées à l'enjeu climatique, l'ensemble des agences de l'eau ont établi leurs plans d'adaptation respectifs au changement climatique entre 2014 et 2019. Si la nature des enjeux territoriaux et les méthodes de réalisation sont parfois distinctes, chaque plan d'adaptation au changement climatique (PACC) affiche des mesures et des objectifs génériques relativement voisins. Par exemple, celui du bassin Adour-Garonne (PACC-AG) a innové par sa démarche participative reposant sur un travail en atelier d'un panel constitué de membres du comité de bassin – des représentants des différents collèges d'usagers –, d'agents de l'agence de l'eau et de chercheurs du conseil scientifique.

Le PACC-AG affiche clairement une ambition de « transformation » dénotant un changement de référentiel d'action et de gestion de l'eau : « s'adapter au changement climatique ne consistera pas uniquement à s'ajuster ; il faudra véritablement transformer nos activités et modes de vie et renoncer par endroits ou sur certains domaines ». La mise en œuvre du PACC-AG nécessitera un effort financier constant de 160 M€/an jusqu'en 2050. Cependant, le projet de SGAGE 2022-2026 n'a que partiellement repris les objectifs du PACC-AG s'attirant, à l'occasion de l'enquête publique, des observations critiques sur son manque d'ambition (notamment, de la part du Conseil économique, social et environnemental (CESER) Nouvelle-Aquitaine, 2021).

Un renouveau des conflits territoriaux de l'eau

Les enjeux de l'eau occupent une place particulière dans le renouveau des conflits territoriaux dans le Sud-Ouest. Le choc social suscité par la mort du militant écologiste Rémi Fraisse a marqué une amplification de la contestation du barrage de Sivens dans le Tarn, en 2014. Plusieurs conflits territoriaux de l'eau sont encore vifs. La construction en 2018, dans le Lot-et-Garonne, de la retenue de Caussade de 1 million de mètres cubes par des agriculteurs irrigants, avec l'appui de la

chambre d'agriculture départementale et le soutien des élus locaux, a été jugée illégale par la justice par deux fois, en 2020 et en 2021. La retenue est toujours en place, un fait dénoncé par les opposants. Les procédures d'appel sont en cours¹.

La controverse des « Bassines » dans le département des Deux-Sèvres concerne la construction de seize réserves d'eau artificielles, une opération portée par une société coopérative locale regroupant 500 agriculteurs irrigants et qui bénéficie de financements publics, émanant notamment de la région Nouvelle-Aquitaine. Lors du congrès annuel de la FNSEA en septembre 2021, ce projet a obtenu l'appui du ministre de l'Agriculture : « Il n'y a pas d'agriculture sans eau. Ces bassines ont une utilité, et donc, il faut qu'elles se fassent »². Ce type d'infrastructures de stockage est vivement contesté tant dans sa finalité que dans ses modalités par une coalition agricole-citoyenne-écologiste-élus conduite par le collectif « Bassines-Non merci ! », qui a lancé des appels à manifestation ayant réuni des milliers d'opposants sur les sites de construction³.

Ces exemples de conflits territoriaux de l'eau, porteurs de tensions sociales et de charges émotionnelles, concernent des projets justifiés par leurs porteurs comme une réponse adaptée au changement climatique, ce que contestent leurs détracteurs. Plutôt que de réduire de manière simpliste la lecture de ces controverses à une opposition entre le camp des « pour » et celui des « contre », il convient de « chercher l'épingle » (Alain, 1985).

Conflits de métriques, d'intérêts et de visions du monde

Ces tensions de plus en plus radicales autour de l'eau doivent en effet être comprises au travers d'une grille de lecture complexe qui articule : la dimension historique d'une sédimentation des controverses passées (Natura 2000, remembrements, drainage de zones humides, politique agricole commune, directive cadre européenne sur l'eau) ; une controverse sur les métriques adoptées pour mesurer les changements hydroclimatiques ; des conflits d'intérêts entre les acteurs des territoires ; une confrontation des visions du monde (des idéologies) opposant des déclassés du monde rural à des tenants du modèle agricole dominant, des promoteurs d'alternatives agroécologiques à des collectifs de citoyens revendiquant un environnement sain et de qualité. Cet ensemble de facteurs constitue le terreau des conflits hydroclimatiques.

¹ <https://france3-regions.francetvinfo.fr/nouvelle-aquitaine/lot-et-garonne/lot-et-garonne-la-retenu-d-eau-de-caussade-construite-en-force-par-des-agriculteurs-a-nouveau-devant-la-justice-1924573.html>

² <https://france3-regions.francetvinfo.fr/nouvelle-aquitaine/deux-sevres/niort/julien-denormandie-les-bassines-sont-necessaires-car-il-n-y-a-pas-d-agriculture-sans-eau-2264224.html>

³ <https://www.ouest-france.fr/economie/agriculture/agriculture-dans-le-marais-poitevin-les-bassines-de-reserves-d-eau-contestees-dee346a6-1af7-11ec-b2d9-21d9b91c55c0>

Trois d'entre eux sont développés ci-après :

- La dimension cognitive des conflits hydroclimatiques repose sur les références et les métriques mobilisées pour « faire preuve » et justifier les prises de position. Pour l'eau, la métrique, héritée de l'après-guerre et destinée à mesurer « de l'eau pour les usages », a évolué au gré de la modernisation technique et aménagiste (Fernandez, 2009). La desserte généralisée des ménages en eau potable a été effective à la fin des années 1970. Au titre de la panoplie aménagiste mobilisée jusque dans les années 1990, figurent : le prélèvement des granulats dans le lit des cours d'eau, l'endiguement des grands fleuves et la construction d'ouvrages de protection contre les inondations, les remembrements et l'assèchement des zones humides, ainsi que le drainage des terres agricoles et les infrastructures et ouvrages de stockage pour l'eau d'irrigation (barrages, retenues collinaires). La formule toujours d'actualité dans les argumentaires sur l'eau – « la goutte d'eau de pluie qui tombe et qui part à la mer, est de l'eau perdue » – continue d'alimenter le discours extractiviste, dans lequel l'eau est considérée comme une « ressource » à mobiliser au service des usages et des activités humaines.
- L'eau, en tant que facteur de production et comme condition de la sécurisation des activités (en particulier, pour l'irrigation des cultures agricoles), nourrit une compétition et alimente les conflits d'intérêts. Les rapports de force, mis en scène dans une radicalité croissante des conflits territoriaux de l'eau, travaillent les arbitrages politiques dans la perspective de pénuries d'eau liées au contexte hydroclimatique.
- Les conflits hydroclimatiques sont aussi culturels et idéologiques. La perspective d'une intensification des crises de l'eau nourrit les angoisses et les récits pour justifier un accès prioritaire à cette ressource vitale. La bataille informationnelle fait rage. Après la concertation des « Assises de l'eau » organisée en 2018-2019 par le ministère de la Transition écologique, le ministère de l'Agriculture a lancé en 2021 le « Varenne agricole de l'eau et du climat », une réflexion toujours en cours qui se justifie au nom de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique. De nombreux organismes, comme le conseil scientifique du comité de bassin Seine-Normandie (en juillet 2021), mais aussi des ONG environnementales et des associations de consommateurs, des représentants professionnels de l'agro-écologie et des élus ont vivement critiqué une « appropriation agricole » de l'eau. Dans le même temps, le ministre de l'Agriculture et les représentants de la profession agricole (FNSEA) ont, à travers leurs déclarations volontaristes, apporté leur soutien à la création de nouvelles ressources en eau pour l'agriculture. Organisé en dehors de toute procédure de consultation indépendante (en dehors de la Commission nationale du débat public (CNDP), du CESE, de la Conférence citoyenne sur le climat), le Varenne de l'eau illustre la bataille idéologique engagée autour des arbitrages politiques à venir portant sur l'affectation de l'eau dans le contexte de changement climatique.

Quelle place pour la science face à ces prises de positions frontales, au risque pour elle d'une instrumentalisation et de tomber dans le piège tendu d'être la caution d'experts providentiels du changement hydroclimatique ? La prégnance des facteurs émotionnels, socioéconomiques et idéologiques invite plutôt à ne guère s'étonner de la faible portée politique de la parole scientifique face aux enjeux climatiques : les preuves scientifiques n'ont pas de prise sur les émotions, et les convictions n'ont pas besoin des vérités scientifiques.

Au final – comme un clin d'œil à la provocation qu'est cette question : « À quoi sert encore le GIEC ? » (Foucart, 2021) –, il faut certainement prendre acte du fait que les politiques de l'eau ont aujourd'hui moins besoin d'une surenchère d'expertise hydroclimatique, dont une bonne part est déjà acquise, que de l'expression politique du véritable « sens » de ces politiques : être au service du vivant et de la société. Un besoin de « sens » s'exprimant dans une triple acception : celle d'une « direction » (quel futur voulons-nous ?) ; d'une « signification » (pour quoi faire ?) et d'une « sensibilité » (selon quels principes de justice ?).

Repenser les politiques de l'eau : passer de l'extractivisme à un nouveau référentiel, celui de la qualité de vie

Le référentiel (Muller, 2000) extractiviste « de l'eau pour les usages » désigne l'articulation entre le projet politique, les infrastructures et les dispositifs de prélèvement de l'eau pour sa valorisation économique, les coalitions sociopolitiques et économiques qui le supportent.

Ce référentiel extractiviste aura été le principe structurant et le modèle dominant retenus par les lois successives (1964, 1992, 2006) sur la gestion de l'eau. Ces différentes lois ont gravé ce référentiel à l'échelle des bassins et des sous-bassins hydrographiques, dans leur organisation institutionnelle particulièrement dense. Elles ont aussi consolidé un certain entre-soi des acteurs de l'eau dans les comités de bassin et dans les intercommunalités de l'eau potable, loin des usagers et à distance des enjeux de la biodiversité et du changement climatique. La préservation des fonctionnalités écologiques a été définie « en creux » par des normes sociotechniques négociables : débits écologiques, continuités écologiques, débits d'objectifs d'étiage et plans de gestion des étiages dans le bassin Adour-Garonne (Marquet, 2014).

Cependant, le référentiel extractiviste butte désormais sur les limites biophysiques révélées par le changement hydroclimatique. Il entre désormais en concurrence avec un référentiel concurrent émergent. Au principe de « l'eau pour les usages », s'oppose le principe « de l'eau pour la qualité de vie ». Ce référentiel invite à passer d'une conception de l'eau comme une « ressource » à une conception de l'eau comme « matrice ». Cela procède d'un changement culturel profond : l'eau considérée comme stock de ressource et support des activités dans le modèle extractiviste, devient un flux

unique et réversible et une condition du vivant dans le référentiel Qualité de vie.

Ce parti pris, incarné dans l'adaptation au changement climatique « par transformation » (Basset *et al.*, 2013) et au fondement de la transition sociale-écologique (Laurent, 2015), nécessite des changements radicaux dans la fixation des objectifs de production, ainsi que dans les modes de vie et les pratiques de consommation. Plus complexe à négocier et visant un périmètre de « concernement » plus large que les actuelles institutions de l'eau, le référentiel transformatif de la transition sociale-écologique bouscule fondamentalement les conventions qui régissent la vie collective (ce à quoi l'on tient, ce à quoi on est prêt à renoncer) et renvoie à des principes de justice dans la lutte contre les inégalités sociales, territoriales et environnementales (Deldrève *et al.*, 2021).

De la mesure des impacts aux sciences de l'anticipation

Les débats sur la complexité (étymologiquement, « ce qui est tissé ensemble ») du changement climatique alimentent l'illusion d'une sortie par la voie du toujours plus de connaissances scientifiques. Les sciences du XX^e siècle ont réalisé des avancées décisives dans la mesure et dans la description des impacts anthropiques et climatiques qui affectent la quantité et la qualité de l'eau (Euzen *et al.*, 2016). Cependant, la spécialisation et la segmentation toujours plus poussées des sciences ont conduit à une séparation des connaissances « qui nous empêche de les relier ensemble pour concevoir les problèmes fondamentaux et globaux tant de nos vies personnelles que de nos destins collectifs » (Morin, 2011).

En réponse, la convergence entre les sciences du climat et l'hydrologie a fait émerger une nouvelle quasi-discipline, l'hydroclimatologie, qui, associée à des approches prospectives, vise à donner une plus juste mesure de la complexité des changements de régimes hydrologiques sous influence climatique et des enjeux des politiques de l'eau du futur dans les territoires (Lhuissier *et al.*, 2016 ; Labbouz *et al.*, 2017).

Cet effort, alliant intégration disciplinaire et démarche prospective, promeut des sciences de l'anticipation (*Future studies*). Associant sciences du climat, sciences de l'eau et sciences de la société, elles participent d'une mise en visibilité des interdépendances socioécologiques (de Godoy Leski, 2021) et dessinent des scénarios sur des futurs de l'eau possibles/souhaitables (Explore 2⁴, 2018 ; Rulleau *et al.*, 2020).

Ces approches intégratives – sciences-société – accordent une place significative aux recherches sur les récits (narratives) et sur les trajectoires d'adaptation (*science-based pathways*⁵ ; Hassnoot, 2013 ; Rocle, 2020). Modélisations, simulations, scénarios contras-

tés, mises en récit et trajectoires d'adaptation participent d'une science à la fois holistique, prospective et incarnée, pour anticiper le changement climatique dans les territoires. Cherchant à dépasser les limites de l'interdisciplinarité, ces approches confrontent les acteurs scientifiques à une pratique contributive et critique de la recherche (Uhalde, 2008) et à une posture éthique de « réflexivité engagée » (Kalaora, 2008). Il s'agit de coupler l'objectif d'intelligibilité scientifique avec la production de savoirs pour l'action répondant au défi hydroclimatique et aux attentes sociétales (Kirchhoff, 2013).

Les futurs de l'eau

Le refus de céder au fatalisme et au réductionnisme de la collapsologie (Larrère *et al.*, 2020), tout comme aux désillusions de trente ans de promesses du développement durable, nous condamnent à l'optimisme. « Se préparer à vivre dans un monde différent » se présente alors comme une « mission » scientifique, à la fois politique et sociétale, permettant d'avoir des prises sur le futur.

Le changement de référentiel nécessaire pour opérer une transition sociale-écologique (Laurent, 2015) invite à profondément reconsidérer le rapport sociétal à l'eau. Cela incite à se mettre à l'écoute, à accélérer la résonance (Rosa, 2022) et à « réparer l'eau » (Rey, 2021). Cela revient à prendre au sérieux et à doter de références scientifiques solides les alternatives émergentes qui se réclament de cette transition sociale-écologique.

Dans l'idée de progrès qui a animé l'ère de la modernité, le futur était posé en termes de « possibilités » et de limites à repousser. Face au défi climatique, penser le futur consiste à orienter l'action vers ce qui est souhaitable (*versus* ce qui ne l'est pas). « Pour agir, il faut savoir imaginer », disait Bachelard. En somme, croire dans les promesses de l'aube plutôt que d'attendre le grand soir.

Bibliographie

- ACCLIMATERRA & LE TREUT H. (dir) (2018), *Anticiper les changements climatiques en Nouvelle-Aquitaine. Pour agir dans les territoires*, Éditions Région Nouvelle-Aquitaine, 488 pages.
- ALAIN (1985), *Propos sur le bonheur*, Essai Poche.
- BASSETT T. & FOGELMAN C. (2013), "Déjà Vu or Something New? The Adaptation Concept in the Climate Change Literature", *Geoforum* 48, pp. 42-53.
- CESER Nouvelle-Aquitaine (2021), « Pour un nouveau pacte social. Réaliser la nécessaire transformation agroécologique en Nouvelle-Aquitaine », rapport de la section « Veille et prospective ».
- CHARBONNIER P. (2021), *Abondance et liberté. Une histoire environnementale des idées politiques*, La Découverte.
- DELDRÈVE V., CANDAU J. & NOÛS C. (2021), *Effort environnemental et équité. Les politiques publiques de l'eau et de la biodiversité en France*, Peter Lang, série « EcoPolis », 534 pages (en Open Access).
- DE GODOY LESKI C., MARQUET V. & SALLES D. (2018), « Sociologie et recherche inclusive : prospective collaborative

⁴ <https://www.creseb.fr/projet-explore-2-les-futurs-de-leau/>

⁵ <https://futureearth.org/initiatives/earth-targets-initiatives/science-based-pathways/>

pour un agenda de recherche sur l'eau », *Sociologies pratiques* 2 (37), Presses de Sciences Po (P.F.N.S.P.), pp. 25-38, hal-02610156

DE GODOY LESKI C. (2021), *Vers une gouvernance anticipative des changements globaux. L'emprise des interdépendances socioécologiques sur une métropole estuarienne : Bordeaux métropole et l'estuaire de la Gironde*, thèse en sociologie, INRAE, Labex COTE, Université de Bordeaux.

DUPUY A., ETCHEBER H. & SALLES D. (2018), « Disponibilité de l'eau et changement climatique », in LE TREUT H. et al. (dir.), *Anticiper les changements climatiques en Nouvelle-Aquitaine. Pour agir dans les territoires*, Ed. Région Nouvelle-Aquitaine, pp. 151-177.

EUZEN A., JEANDEL C. & MOSSERI R. (2016), *L'eau à découvert*, CNRS Éditions, 360 pages.

FERNANDEZ S. (2009), *Si la Garonne avait voulu... Étude de l'étiologie déployée dans la gestion de l'eau de la Garonne, en explorant l'herméneutique sociale qui a déterminé sa construction*, thèse en science politique, AgroParisTech (tel-00466462).

FOUCART S. (2021), « À quoi sert encore le GIEC ? », *Le Monde*, 4 septembre.

HAASNOOT M., KWAKKEL J.-H., WALKER W.-E. & TER MAAT J. (2013), "Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world", *Global Environmental Change*, vol. 23, Issue 2, pp. 485-498, ISSN 0959-3780.

KIRCHHOFF C. J., LEMOS M.-C. & DESSAI S. (2013), "Actionable Knowledge for Environmental Decision Making: Broadening the Usability of Climate Science", *Annual Review of Environment and Resources* 38, n°1, 17 octobre, pp. 393-414, <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-022112-112828>

KALAORA B. (2008), « De l'interdisciplinarité à la réflexivité engagée », in GALOCHET M., LONGUÉPÉE J., MOREL V. & PETIT O. (dir.), *L'environnement : discours et pratiques interdisciplinaires*, Arras, Artois Presses Université, pp. 137-150.

LABBOUZ B., SALLES D. & VALETTE P. (2017), « Les sociétés garonnaises face aux changements globaux : quelles adaptations possibles en 2050 ? », in *Sud-Ouest européen. Regards croisés sur les fleuves Èbre et Garonne*, Presses universitaires du Mirail.

LARRÈRE C. & LARRÈRE R. (2020), *Le Pire n'est pas certain. Essai sur l'aveuglement catastrophiste*, Premier Parallèle, 208 pages.

LAURENT E. & POCHET P. (2015), *Pour une transition sociale-écologique. Quelle solidarité face aux défis environnementaux ?*, Les Petits matins.

LHUISSIER L., LAMBLIN V., SAUQUET E., ARAMA Y., GOULARD F. et al. (2016), « Retour sur l'étude prospective Garonne 2050 », *La Houille Blanche – Revue internationale de l'eau*, EDP Sciences, pp. 30-35, hal-01743229

MARQUET V. (2014), *Les voies émergentes de l'adaptation au changement climatique dans la gestion de l'eau en France et au Québec. Mise en visibilité et espaces de définition*, thèse en sociologie, Irstea-Université de Bordeaux, 474 pages.

MERMET L. & SALLES D. (dir) (2015), *Environnement : la concertation apprivoisée, contestée, dépassée ?*, Ed. De Boeck.

MORIN E. (2011), *La voie*, Fayard.

MULLER P. (2000), « L'analyse cognitive des politiques publiques : vers une sociologie politique de l'action publique », in *Revue française de science politique*, 50^e année, n°2, pp. 189-208.

PACC (2018), *Plan d'adaptation au changement climatique du bassin Adour-Garonne*, Agence de l'eau Adour-Garonne, 64 pages.

REY O. (2021), *Réparer l'eau*, Stock.

ROCLE N., REY-VALETTE H., BERTRAND F., BECU N., LONG N. et al. (2020), "Paving the way to coastal adaptation pathways: An interdisciplinary approach based on territorial archetypes", *Environmental Science and Policy* 110, Elsevier, pp. 34-45, 10.1016/j.envsci.2020.05.003

ROSA H. (2022), *Accélérons la résonnance !*, Le Pommier.

RULLEAU B., SALLES D. et al. (2020), "Crafting futures together. Scenarios for water infrastructure asset management in a context of global change", *Water Supply*.

SALLES D. & LE TREUT H. (2017), « Comment la région Nouvelle-Aquitaine anticipe le changement climatique ? », *Sciences Eaux & Territoires*, n°22, pp. 14-17.

SALLES D. (2006), *Les défis de l'environnement, démocratie et efficacité*, Édition Sylleps, Coll. « Écologie et Politique ».

SHINN T. & RAGOUET P. (2005), *Controverses sur la science : pour une sociologie transversaliste de l'activité scientifique*, Paris, Éditions Raisons d'agir.

Le changement climatique en montagne : impacts, risques et adaptation¹

Par Samuel MORIN

Université de Toulouse, Univ. Grenoble Alpes, Météo-France, CNRS,
Centre national de recherches météorologiques, Toulouse et Grenoble

Les régions de montagne concentrent des caractéristiques qui rendent les effets du changement climatique particulièrement visibles. Elles constituent ainsi des sentinelles du changement en cours et à venir. Elles disposent d'atouts naturels et socio-économiques qui les distinguent d'autres zones géographiques, notamment sur le plan des ressources en eau, de la biodiversité et du patrimoine agricole et culturel. L'environnement spécifique de haute montagne est le support d'activités emblématiques de loisirs et de tourisme. Les régions de montagne sont également le siège de nombreux aléas naturels gravitaires qui complexifient et renchérissent leur développement socio-économique. Le changement climatique agit sur la quasi-totalité de ces enjeux interconnectés, en modifie les caractéristiques et ébranle les modes de gestion traditionnels des atouts et difficultés intrinsèques des régions de montagne. Connaissances interdisciplinaires et outils se développent pour pouvoir tenir compte de ces enjeux dans leurs stratégies territoriales de développement.

Changement climatique en montagne : observations et projections

L'environnement de montagne et les activités humaines qui s'y développent sont particulièrement sensibles aux conditions météorologiques. Ces dernières ont évolué depuis plusieurs décennies et constituent des manifestations locales du changement climatique à l'œuvre au niveau planétaire. En montagne comme ailleurs, le changement climatique modifie non seulement la moyenne multi-annuelle des conditions météorologiques propres à chaque saison (température, précipitations, enneigement, etc.), mais aussi la distribution de phénomènes rares, qui peuvent être intenses, voire extrêmes. Dans les Alpes françaises et les Pyrénées, l'augmentation de la température moyenne annuelle a atteint près de 2°C depuis le début du XX^e siècle. L'ampleur de cette augmentation dépasse celle de l'accroissement de la température mondiale, comme c'est le cas pour la plupart des continents. Le réchauffement a été au cours des dernières décennies particulièrement marqué en été. L'amplification du réchauffement dans les régions de montagne, en fonction de l'altitude, est souvent évoquée, mais elle est difficile

à mettre en évidence de façon claire sur la base des observations disponibles. Il s'avère cependant que les milieux de montagne et les conditions météorologiques afférentes varient en fonction de l'altitude, ce qui explique pourquoi les manifestations du changement climatique sont aussi fortement dépendantes de l'altitude. Par exemple, le manteau neigeux est généralement éphémère à basse altitude et est peu épais et fortement variable d'une année sur l'autre à moyenne altitude (1 000 à 2 000 m d'altitude), tandis qu'il est beaucoup plus abondant en haute montagne. Le réchauffement, qui entraîne en général une transition favorisant les chutes de pluie au détriment des chutes de neige à basse et moyenne altitude, et une intensification de la fonte printanière à toutes les altitudes, se manifeste donc par une raréfaction du manteau neigeux qui est variable selon l'altitude et les mois de l'année : une raréfaction forte tout l'hiver et au printemps à basse et moyenne altitude (près d'un mois de réduction de la durée d'enneigement depuis les années 1970) et une baisse au printemps à haute altitude (Matiu *et al.*, 2021). Ces évolutions différenciées ont des conséquences en cascade sur les aléas naturels : par exemple, l'aléa avalancheux change de caractère, avec une raréfaction globale de celui-ci (mais pas de disparition totale)

¹ **Remerciements** : cette synthèse s'est nourrie des travaux menés dans le cadre d'une collaboration interdisciplinaire avec de nombreux collègues travaillant au CNRM (Météo-France, CNRS), à Météo-France (direction de la Climatologie et des Services climatiques), au LESSEM et à l'ETNA (INRAE), à l'Institut des géosciences de l'environnement (Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD) et au CESBIO (Université Toulouse, CNRS, IRD, CNES), et notamment l'équipe de rédaction du rapports GIEC SROCC (2019), ainsi que de contacts et d'interactions établis avec les praticiens et acteurs socio-économiques de la montagne.



Figure 1 : Évolution de la Mer de glace (glacier situé dans le massif du Mont-Blanc, Haute-Savoie) entre 1919 et 2019. Crédits : Institut de géosciences de l'environnement (<http://ige-vis.univ-grenoble-alpes.fr/glacioclim/glacioclim.html>).

et davantage d'avalanches de neige humide, y compris en plein hiver, ce qui affecte les stratégies de gestion de ce risque. Le recul des glaciers est probablement l'illustration la plus spectaculaire du changement climatique sous nos latitudes (voir la Figure 1 ci-dessus). Il est la conséquence d'un déséquilibre croissant entre l'accumulation (surtout hivernale) de neige et la fonte estivale accrue sous l'effet de l'augmentation de la température, en particulier lors des vagues de chaleur.

Du fait d'émissions de gaz à effet de serre (issues de la combustion des ressources fossiles et du changement d'usage des sols) continuant à se situer à des niveaux comparables à ceux actuels au cours des prochaines décennies – même si une réduction s'amorce –, l'aggravation du changement climatique et de ses effets est inévitable à cette échelle de temps (GIEC, 2021). La vitesse et l'ampleur de la réduction dès à présent des émissions de gaz à effet de serre conditionneront fortement l'évolution climatique au cours de la seconde moitié du XXI^e siècle. La fréquence et l'intensité des vagues de chaleur ainsi que les caractéristiques du manteau neigeux saisonnier sont directement liées au niveau de réchauffement atteint une fois stabilisé : dans le cas de tels phénomènes, une éventuelle stabilisation du climat lorsque l'humanité aura atteint la neutralité carbone conduira concomitamment à une stabilisation de leurs caractéristiques (voir la Figure 2 de la page suivante). Pour les glaciers, la situation est très différente,

car cette stabilisation s'effectuera à des niveaux de température, et donc d'intensité de fonte, défavorables aux glaciers qui poursuivront leur recul – c'est déjà le cas aujourd'hui. C'est pour cette raison que, dans tous les scénarios, la disparition de la grande majorité des glaciers de montagne est attendue en Europe au cours de ce siècle, à l'exception des zones de plus haute altitude dans le cas de scénarios de très fortes réductions des émissions de gaz à effet de serre permettant d'atteindre la neutralité carbone planétaire d'ici à la moitié du XXI^e siècle (Hock *et al.*, 2019 ; Vincent *et al.*, 2019).

Conséquences du changement sur les ressources en eau, les aléas naturels, les écosystèmes

Les conséquences du recul des glaciers pour les ressources en eau dépendent de la saison et de la distance des zones concernées par rapport aux zones englacées. En effet, même s'ils constituent des objets majestueux et spectaculaires, les glaciers recouvrent des surfaces relativement restreintes et influencent les ressources en eau surtout en été et à faible distance. La raréfaction du manteau neigeux et l'évolution de la saisonnalité des précipitations (accroissement hivernal et baisse estivale) conduisent à une modification de la sai-

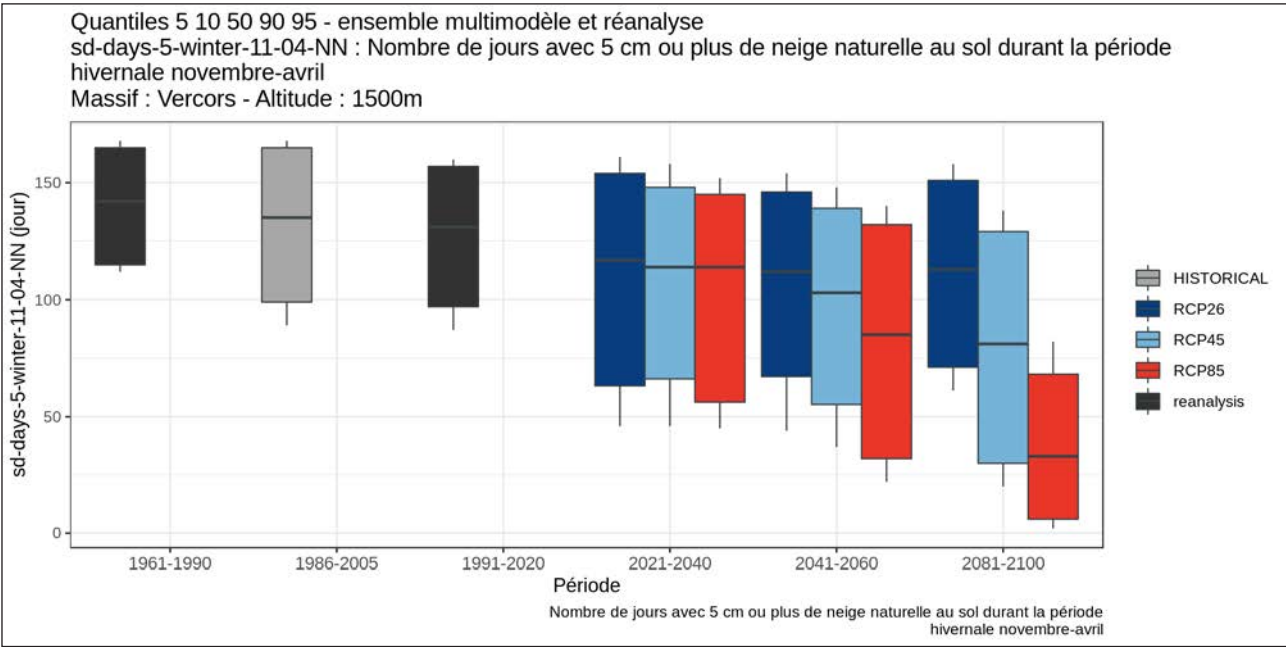


Figure 2 : Évolution passée (1961-1990 et 1991-2019) et future en fonction de plusieurs scénarios de concentration en gaz à effet de serre au XXI^e siècle et de l'enneigement naturel (nombre de jours avec plus de 5 cm de hauteur de neige) dans le massif du Vercors à 1 500 m d'altitude. Méthode d'après Verfaillie *et al.* (2018).

sonnalité du débit des rivières, avec une augmentation de celui-ci en hiver, l'avancée du pic de fonte au printemps, et une baisse en été – sauf à proximité immédiate des glaciers, tant que ceux-ci n'auront pas vu leur surface réduite de façon trop substantielle (Hock *et al.*, 2019 ; Laurent *et al.*, 2020). À ces tendances de fond concernant les ressources en eau se superposent les effets de l'intensification des précipitations, qui, paradoxalement, conduisent à une augmentation de l'ampleur des précipitations intenses, avec des conséquences accrues en termes de crues, de glissements de terrain et d'autres phénomènes que favorisent de telles précipitations, et ce malgré une raréfaction globale des ressources en eau en été. Le recul des glaciers conduit aussi à un accroissement d'un certain nombre d'aléas gravitaires, tels que des glissements de terrain dans les régions de moraine instables ou des chutes de séracs, voire à l'imbrication et à l'enchaînement de plusieurs aléas. Le réchauffement entraîne également le dégel et la déstabilisation du pergélisol (permafrost), avec des conséquences telles que l'effondrement de parois en très haute altitude, là où le pergélisol est actuellement présent.

L'évolution des conditions météorologiques et hydrologiques sous l'effet du changement climatique a des conséquences pour les écosystèmes de montagne. L'accroissement de la température entraîne une augmentation de la productivité primaire des prairies de montagne (verdissement), sauf dans les situations de sécheresse, qui sont de plus en plus fréquentes. Cela illustre la nécessité d'analyser de façon combinée plusieurs variables climatiques. L'augmentation des températures et les sécheresses répétées exercent une pression croissante sur de nombreuses forêts de montagne, ce qui, outre les effets directs sur leur mortalité, les fragilise vis-à-vis de parasites tels que les scolytes

et accentue donc leur dégradation. Ces changements entraînent des migrations vers de plus hautes altitudes pour de nombreux écosystèmes. Toutefois, cette vitesse de migration n'est pas toujours suffisante pour contrecarrer l'effet d'évolution climatique. De surcroît, les surfaces potentiellement disponibles à plus haute altitude sont plus restreintes, voire inexistantes dans les massifs de moyenne montagne.

Impacts et risques pour les activités humaines

Les rapports successifs du GIEC ont permis de doter la communauté scientifique de cadres conceptuels de plus en plus clairs pour décrire et quantifier les impacts et les risques climatiques. Le « risque » climatique fait référence au potentiel de conséquences néfastes sur un système naturel ou humain. Il résulte de la combinaison entre un « aléa » (la modification des caractéristiques d'un phénomène physique par le changement climatique, aussi appelé « facteur climatique générateur d'impact » – *climatic impact-driver* – dans le rapport du GIEC de 2021) et l'« exposition » et la « vulnérabilité » du système analysé vis-à-vis de cet aléa. Un « impact » climatique correspond à un risque réalisé ; il fait donc généralement référence à des observations passées. La Figure 3 de la page suivante synthétise les changements passés et les impacts physiques liés au recul de la cryosphère (glaciers, manteau neigeux, pergélisol) de montagne dans les Alpes et les Pyrénées (Hock *et al.*, 2019).

En montagne, les activités humaines, dans leur très grande majorité, sont sensibles aux conditions météorologiques et sont donc susceptibles d'être concernées par le risque climatique. Dans le domaine de la gestion

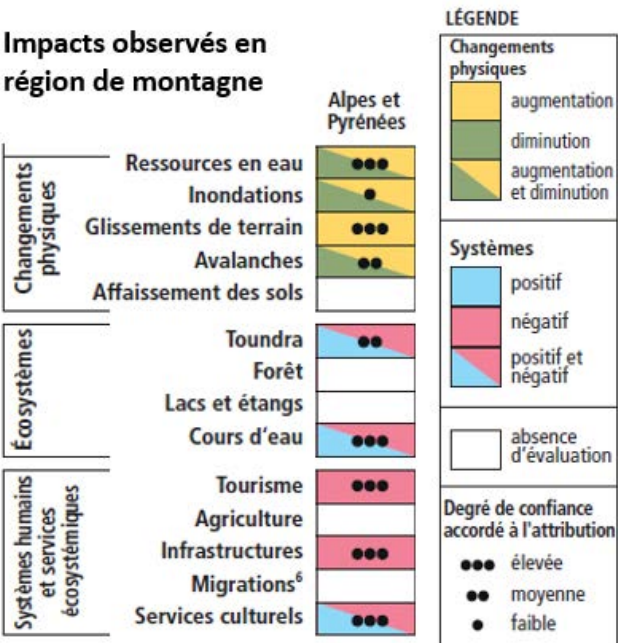


Figure 3 : Synthèse des impacts observés du recul de la cryosphère de montagne (manteau neigeux saisonnier, glaciers, pergélisol) sur les composants physiques, les écosystèmes et les services humains et écosystémiques de l'environnement de montagne. D'après le résumé à l'intention des décideurs du rapport spécial « Océan & Cryosphère » (GIEC, 2019).

des risques naturels, laquelle a des conséquences sur les conditions d'habitabilité des régions de montagne ainsi que sur leur développement économique, les effets du changement climatique se combinent à des évolutions de l'exposition et de la vulnérabilité. Les mesures de prévention adoptées, telles que des ouvrages de protection (paravalanches, filets de protection contre les chutes de blocs, etc.) ou la présence de forêts ayant une fonction de protection, contribuent à limiter l'aléa ou l'exposition des enjeux. Par ailleurs, l'évolution des trois composantes précitées du risque suit parfois des trajectoires contrastées (Zgheib *et al.*, 2022). Pour la plupart des aléas gravitaires, le changement climatique conduit à élargir la gamme des possibles, en étendant la plage d'altitude et des saisons où ces aléas peuvent être rencontrés, ce qui peut conduire à revisiter les stratégies de prévention et de réduction des risques. L'activité touristique, en particulier la pratique des sports d'hiver, est particulièrement dépendante des conditions météorologiques, notamment de la fiabilité de l'enneigement naturel ainsi que de la capacité à produire de la neige. Cela requiert des conditions météorologiques particulières (des températures suffisamment basses combinées à un vent faible). La production de neige, à l'instar du damage, fait partie des méthodes courantes de travail et de gestion de la ressource neige dans les domaines skiables. Elle a été initialement développée pour réduire l'impact des situations de faible enneigement naturel rencontrées lors de certains hivers. Les projections climatiques indiquent toutes une dégradation des conditions d'enneigement sur les pistes au cours des prochaines décennies, dans des proportions variables selon les stations. Toutefois, les études récentes montrent que l'impact passé du changement climatique et les risques futurs qu'il fait

peser sur les conditions d'exploitation des domaines skiables dépendent fortement de la prise en compte ou non de l'effet de la production de neige, ainsi que du contexte local de la station, tant en ce qui concerne sa gamme d'altitude et son emplacement que le modèle économique de la destination considérée et de son degré de dépendance – plus ou moins exclusive – à un niveau d'enneigement suffisant garanti (Spandre *et al.*, 2019). Les conditions de la pratique de l'alpinisme ont elles aussi été fortement affectées par le changement climatique, en particulier le recul des glaciers qui s'accompagne de conséquences fortes sur le niveau de danger des itinéraires classiques (Mourey *et al.*, 2019). Ces modifications concernent, plus généralement, le rapport qu'entretiennent les sociétés humaines avec les zones de haute montagne, y compris l'évolution majeure du paysage qu'entraîne le recul glaciaire et qui touche à l'image même du patrimoine naturel et culturel des sociétés européennes (Bosson *et al.*, 2019).

Options et enjeux de l'adaptation

L'adaptation au changement climatique a pour objectif de réduire les risques climatiques induits par les modifications inévitables des facteurs climatiques générateurs d'impacts, et ce en minorant l'exposition et la vulnérabilité des systèmes humains concernés. En parallèle des efforts portant sur la réduction massive des émissions de gaz à effet de serre, seuls à même de réduire durablement l'ampleur de l'augmentation des risques climatiques, une adaptation est d'ores et déjà à l'œuvre, implicitement ou explicitement, dans les territoires de montagne. Dans certains cas, les méthodes de réduction des risques mises en œuvre en matière de variabilité interannuelle des conditions météorologiques (par exemple, la gestion et la production de neige pour faire face à la variabilité de l'enneigement naturel) peuvent être considérées comme des méthodes d'adaptation au changement climatique, de façon plus ou moins assumée par les acteurs qui les utilisent. Le cas de la production de neige, dite aussi de culture ou artificielle, est emblématique d'un certain nombre des débats et des controverses qui traversent les communautés de montagne : leur rapport au développement touristique local, leur positionnement vis-à-vis du changement climatique et de ses conséquences actuelles et futures, la nature des relations nouées entre les divers acteurs concernés (Berard-Chenu, 2021). Le développement de méthodes scientifiques dans le but d'estimer la fiabilité de l'enneigement naturel et de gérer les domaines skiables (Spandre *et al.*, 2019) a permis de contribuer à accroître la prise de conscience par l'ensemble des acteurs des risques climatiques. Dans certains cas, notamment à la suite de la réalisation d'études dédiées permettant d'analyser finement les conséquences de l'évolution climatique à l'échelle d'une station de sport d'hiver donnée en mobilisant une approche tenant compte des caractéristiques locales et des questionnements de plusieurs acteurs du territoire (voir, par exemple, www.climsnow.org), il a été possible de produire des éléments de diagnostic ayant permis une discussion locale plus riche et parfois de dépasser les antagonismes et les controverses qui caracté-

risent souvent le traitement politique ou médiatique de ce sujet. Cette expérience rejoint les conclusions du rapport spécial « Océan & Cryosphère » du GIEC sur ce sujet : le succès des démarches d'adaptation est avant tout un enjeu de gouvernance, qui est facilité par la production et la mise à disposition de connaissances et d'informations sur l'évolution du climat régional et ses effets. Cela s'applique également aux enjeux d'adaptation au changement climatique dans les domaines des risques naturels et de la gestion des ressources en eau. Là aussi, la prise en compte du changement climatique est porteuse de sens quand elle vient nourrir une structure de gouvernance adaptée à la délibération et à la prise de décision sur ce type de sujets qui engagent des intérêts divergents à des échelles de temps et d'espace différentes, et ce pour l'ensemble des parties prenantes. En complément, les enjeux de l'adaptation sont fortement transverses en zone de montagne (ArLOT, 2019 ; Tschanz *et al.*, 2022) ; ils constituent une entrée commune permettant de renouveler le dialogue intersectoriel à l'aune d'une menace considérée comme nouvelle et touchant l'ensemble des domaines d'activité. L'adaptation au changement climatique constitue donc une opportunité pour rénover les cadres délibératifs et de décision aux échelles territoriales dans les régions de montagne, et de mettre ceux-ci au service d'une ambition commune, celle visant à faire face à l'urgence climatique touchant l'ensemble des composantes socio-économiques et environnementales interconnectées des zones de montagne.

Références bibliographiques

- ARLOT M.-P. (2019), « Le projet AdaMont : enjeux, valeurs et fondements méthodologiques », *Changement climatique : quelle stratégie d'adaptation pour les territoires de montagne ?*, *Revue Science, Eaux & Territoires* 28, pp. 8-11, <https://dx.doi.org/10.14758/SET-REVUE.2019.2.03>
- BERARD-CHENU L., « Trajectoires d'évolution des stations de sports d'hiver des Alpes françaises : la place de la production de neige », thèse de l'Université Grenoble – Alpes (2021), <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03555501>
- BOSSON J.-B., HUSS M. & OSIPOVA E. (2019), "Disappearing World Heritage Glaciers as a Keystone of Nature Conservation in a Changing Climate", *Earth's Future* 7 (4), pp. 469-479, doi:10.1029/2018ef001139
- HOCK R., RASUL G., ADLER C., CÁCERES B., GRUBER S., HIRABAYASHI Y., JACKSON M., KÄÄB A., KANG S., KUTUZOV S., MILNER A., MOLAU U., MORIN S., ORLOVE B. & STELTZER H. (2019), "High Mountain Areas", In : "IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate", PÖRTNER H.-O., ROBERTS D. C., MASSON-DELMOTTE V., ZHAI P., TIGNOR M., POLOCZANSKA E., MINTENBECK K., ALEGRÍA A., NICOLAI M., OKEM A., PETZOLD J., RAMA B. & WEYER N. M. (eds.), https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/06_SROCC_Ch02_FINAL.pdf (sous presse).
- GIEC (2021), "Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", MASSON-DELMOTTE V., ZHAI P., PIRANI A., CONNORS S. L., PÉAN C., BERGER S., CAUD N., CHEN Y., GOLDFARB L., GOMIS M. I., HUANG M., LEITZELL K., LONNOY E., MATTHEWS J. B. R., MAYCOCK T. K., WATERFIELD T., YELEKÇİ O., YU R. & ZHOU B. (eds.), Cambridge University Press (In Press).
- LAURENT L., BUONCRISTIANI J.-F., POHL B. *et al.* (2020), "The impact of climate change and glacier mass loss on the hydrology in the Mont-Blanc massif", *Sci. Rep.* 10, 10420, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67379-7>
- MATIU M., CRESPI A., BERTOLDI G., CARMAGNOLA C. M., MARTY C., MORIN S., SCHÖNER W., CAT BERRO D., CHIOGNA G., DE GREGORIO L., KOTLARSKI S., MAJONE B., RESCH G., TERZAGO S., VALT M., BEOZZO W., CIANFARRA P., GOUTTEVIN I., MARCOLINI G., NOTARNICOLA C., PETITTA M., SCHERRER S. C., STRASSER U., WINKLER M., ZEBISCH M., CICOGLA A., CREMONINI R., DEBERNARDI A., FALETTO M., GADDO M., GIOVANNINI L., MERCALLI L., SOUBEYROUX J.-M., SUŠNIK A., TRENTI A., URBANI S. & WEILGUNI V. (2021), "Observed snow depth trends in the European Alps: 1971 to 2019", *The Cryosphere* 15, pp. 1343-1382, <https://doi.org/10.5194/tc-15-1343-2021>
- MOUREY J., MARCUZZI M., RAVANEL L. & PALLANDRE F. (2019), "Effects of climate change on high Alpine environments: the evolution of mountaineering routes in the Mont Blanc massif (Western Alps) over half a century", *Arct. Antarct. Alp. Res.* 51(1), pp. 176-189, <https://dx.doi.org/10.1080/15230430.2019.1612216>
- SPANDRE P., FRANÇOIS H., VERFAILLIE D., LAFAYSSE M., DÉQUÉ M., ECKERT N., GEORGE E. & MORIN S. (2019), "Climate controls on snow reliability in French Alps ski resorts", *Sci. Rep.* 9, p. 8043, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44068-8>
- TSCHANZ L., ARLOT M.-P., PHILIPPE F., VIDAUD L., MORIN S., MALDONADO E., GEORGE E. & SPIEGELBERGER T. (2022), "A transdisciplinary method, knowledge model and management framework for climate change adaptation in mountain areas applied in the Vercors, France", *Reg. Environ. Change* 22, 15, <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01862-3>
- VERFAILLIE D., LAFAYSSE M., DÉQUÉ M., ECKERT N., LEJEUNE Y. & MORIN S. (2018), "Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1.500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps", *The Cryosphere* 12, pp. 1249-1271, <https://doi.org/10.5194/tc-12-1249-2018>
- VINCENT C., PEYAUD V., LAARMAN O., SIX D., GILBERT A., GILLET-CHAULET F., BERTHIER É., MORIN S., VERFAILLIE D., RABATEL A., JOURDAIN B. & BOLIBAR J. (2019), « Déclin des deux plus grands glaciers des Alpes françaises au cours du XXI^e siècle : Argentière et Mer de glace », *La Météorologie*, série 8, 106, pp. 49-58, <https://doi.org/10.4267/2042/70369>
- ZGHEIB T., GIACONA F., GRANET-ABISSET A.-M., MORIN S., LAVIGNE A. & ECKERT N. (2022), "Spatio-temporal variability in avalanche risk trajectories in the French Alps", *Reg. Environ. Change* 22, 8, <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01838-3>

Des impacts sanitaires du changement climatique déjà bien visibles : l'exemple des canicules

Par Lucie ADÉLAÏDE, Olivier CHANEL¹ et Mathilde PASCAL²

Aix-Marseille School of Economics, Santé publique France

Le changement climatique, la perte de la biodiversité et l'altération globale de l'environnement détériorent la santé des populations. Plus particulièrement, l'augmentation des périodes marquées par des températures élevées et leur persistance pourraient constituer un risque majeur pour une large part de la population et limiter drastiquement l'activité humaine. Pourtant, les vagues de chaleur sont sous-représentées dans les analyses des événements météorologiques extrêmes, en particulier dans les évaluations économiques. Ce manque d'études, associé à la faible perception par la population du risque lié à la chaleur, limite la mise en place de mesures d'adaptation, alors que les effets des canicules sont en grande partie évitables. Cet article présente l'évolution de l'impact économique global des effets sanitaires des vagues de chaleur observées en France entre 1974 et 2020.

Introduction

Le changement climatique, la perte de biodiversité et l'altération globale de l'environnement constituent une menace majeure pour la santé physique et mentale de la population (IPCC, 2018 ; Romanello *et al.*, 2021). Les mécanismes d'action sont divers et interdépendants : amplification de risques sanitaires déjà existants, aggravation des inégalités, difficultés d'accès à des ressources essentielles pour la santé et le bien-être, crises sanitaires et sociales multiples... (IPCC, 2014).

Agir pour maintenir l'augmentation de la température moyenne mondiale en dessous de + 2°C à l'horizon 2100 par rapport au niveau préindustriel, tout en protégeant la biodiversité et en développant l'adaptation, est une priorité de santé publique largement partagée par la communauté scientifique internationale (Atwoli *et al.*, 2021 ; Romanello *et al.*, 2021) et par les professionnels de santé publique (IANPHI, 2021 ; WHO, 2021).

Une analyse des enjeux sanitaires à prendre en compte d'ici à 2030 en France a permis d'identifier plusieurs risques environnementaux et infectieux susceptibles d'être aggravés par le changement climatique. L'exposition à des températures élevées est le risque présentant l'évolution la plus rapide (Pascal, 2010),

puisqu'elle provoque, chez toutes les populations, des effets multiples sur l'organisme (Hanna *et al.*, 2015), observables même à des températures modérées et se traduisant par une augmentation de la mortalité et un recours accru aux soins (Gasparrini *et al.*, 2015 ; Cheng *et al.*, 2019).

Au niveau mondial, cette influence du changement climatique s'observe déjà. Entre 1990 et 2018, 37 % des décès liés à la chaleur seraient attribuables à une augmentation des températures induite par le changement climatique (Vicedo-Cabrera *et al.*, 2021). En 2019, au moins 345 000 personnes seraient décédées du fait de la chaleur, et le nombre de jours pendant lesquels une activité physique devient dangereuse augmente rapidement. En 2020, plus de 295 milliards d'heures de travail auraient ainsi été perdues (Lancet Countdown, 2021). À moyen terme, dans des scénarios de réchauffement dépassant + 2°C en température moyenne globale, la chaleur pourrait constituer un risque majeur pour une large part de la population et limiter drastiquement l'activité humaine dans plusieurs zones du monde (Hanna *et al.*, 2015 ; Watts *et al.*, 2021).

Les vagues de chaleur sont pourtant sous-représentées dans les analyses des événements météorologiques extrêmes, en particulier dans les évaluations

¹ Olivier Chanel a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence nationale de la recherche au titre du programme d'investissements d'avenir portant la référence ANR-17-EURE-0020 et de l'initiative d'excellence d'Aix-Marseille Université – A*MIDEX.

² Nous remercions Guillaume Boulanger pour ses remarques pertinentes.

économiques. Celles-ci valorisent classiquement les conséquences directes sur les infrastructures et les biens assurables, accordant peu de poids aux impacts humains. Ainsi, Kousky (2014) estime qu'à l'échelle mondiale, les événements climatiques extrêmes représentaient annuellement entre 94 et 130 milliards de dollars sur la période 2000-2012, mais le fardeau économique associé aux impacts sur la santé est rarement intégré. De même, la Fédération française de l'assurance (FFA, 2021) s'attend à un doublement des impacts assurables sur la période 2020-2050 par rapport à 1989-2019 dans un scénario prévoyant un réchauffement de + 4°C d'ici à 2100, mais ignorant les impacts sanitaires liés aux vagues de chaleur.

En France, la perception des risques liés à la chaleur reste faible (Laaidi *et al.*, 2019), et l'adaptation à ceux-ci est peu développée (Dantec *et al.*, 2019). L'action publique se focalise sur les canicules, ces épisodes ponctuels susceptibles d'induire un risque sanitaire justifiant une réponse coordonnée pour en réduire l'impact. Même si les canicules ne représentent qu'une partie de l'effet total de la chaleur (environ un tiers entre 2000 et 2010 (Pascal *et al.*, 2018)), ce sont les événements extrêmes ayant le plus d'impacts en France, totalisant plus de 37 000 décès depuis les années 1970 (Pascal *et al.*, 2021). Elles présentent également un potentiel disruptif important, comme l'a montré la canicule d'août 2003 et ses 15 000 décès supplémentaires comptabilisés en moins de deux semaines (Fouillet *et al.*, 2006), et des coûts directs supportés par l'Assurance maladie et estimés entre 10 et 280 millions d'euros (DGS, 2009). Ces estimations ne tiennent pas compte des impacts supportés par la population en termes de décès et de perte de bien-être.

Ce manque d'études, associé à la faible perception par la population du risque lié à la chaleur, limite la mise en place de mesures d'adaptation, alors que les effets des canicules sont en grande partie évitables. Une évaluation économique globale des effets sanitaires des vagues de chaleur en France a été réalisée sur la période 2015-2020 (Adélaïde *et al.*, 2021). Nous étendons ici le champ de celle-ci pour présenter l'évolution rétrospective de cet impact économique depuis 1974.

Méthode

Identification des canicules

L'analyse considérée porte sur les 96 départements de la France hexagonale sur la période 1974-2020. Depuis 2004, le système d'alerte Canicule détermine les périodes de canicule et établit les niveaux de vigilance (qui correspondent à des déclenchements d'alerte et à la réalisation des mesures associées) allant du vert (absence de risque) au rouge (risque maximal). Les épisodes caniculaires correspondent aux périodes entre juin et septembre durant lesquelles les températures diurnes et nocturnes dépassent pendant au moins trois jours des seuils départementaux (Pascal *et al.*, 2021). Sur la période 1974-2003, soit avant la mise en place du système d'alerte, les périodes de canicule et les

niveaux de vigilance sont identifiés rétrospectivement à partir des données de température de Météo-France.

Estimation de l'impact sanitaire des vagues de chaleur

Cette estimation porte sur trois points : les impacts en termes de surmortalité, de perte de bien-être et de recours accru aux soins.

- **Les estimations de la surmortalité** sont issues, depuis 2004, des bilans annuels réalisés par Santé publique France. Elles s'appuient sur une méthode reposant sur une comparaison par rapport aux années précédentes (Pascal *et al.*, 2021). Avant 2004, la même méthode a été appliquée rétrospectivement.
- **La perte de bien-être** est évaluée au regard de la restriction d'activité associée à une chaleur extrême, laquelle est susceptible d'entraîner des symptômes (fatigue, crampes, évanouissements, baisse de la vigilance et des fonctions cognitives) pour une grande partie de la population et d'amener celle-ci à réduire drastiquement son activité. Cette population est celle résidant pendant les jours de vigilance rouge dans les départements sous étude (avant 2004, ce sont les départements qui auraient pu faire l'objet d'une vigilance rouge sur la base de l'intensité de chaleur observée).
- **L'analyse du recours aux soins** (morbidity) a été restreinte à la période 2015-2019, par manque de données disponibles avant 2015 et pour ne pas être biaisée par les effets de la pandémie de Covid-19 sur le système de santé en 2020. Les passages aux urgences, les interventions de SOS Médecins et les hospitalisations décidées à la suite de ces visites sont obtenus quotidiennement pour chaque département grâce à la remontée des informations via le système de surveillance syndromique Sursaud®. Les indicateurs étudiés sont les suivants : malaise, hyponatrémie, hyperthermie/coup de chaleur, fièvre isolée et déshydratation (Atiki *et al.*, 2019). Les impacts sur le recours aux soins sont calculés en comparant les nombres quotidiens de cas observés à ceux attendus en l'absence de vagues de chaleur.

Estimations monétaires

La perspective sociétale est ici utilisée et les estimations monétaires sont exprimées en euros constants 2017 (€₂₀₁₇).

La valorisation économique de la mortalité nécessite la recherche de valeurs d'évitement d'un décès (VED), qui soient consensuelles et, si possible, spécifiques à la canicule, et la prise en compte de leur évolution dans le temps.

Pour notre étude, nous sommes partis, en l'absence de valeurs propres à la canicule, des VED recommandées pour l'évaluation des politiques publiques en France. Toutefois, elles ont fortement cru sur notre période d'étude (MTES, 2021) : 0,24 million de francs (0,3 million €₂₀₁₇) en 1974, 1 million en 1980 (0,57 million €₂₀₁₇), 1,6 million en 1986 (0,52 million €₂₀₁₇), 3,7 millions en 1994 (0,56 million €₂₀₁₇), 1,5 million d'euros en 2001 (1,83

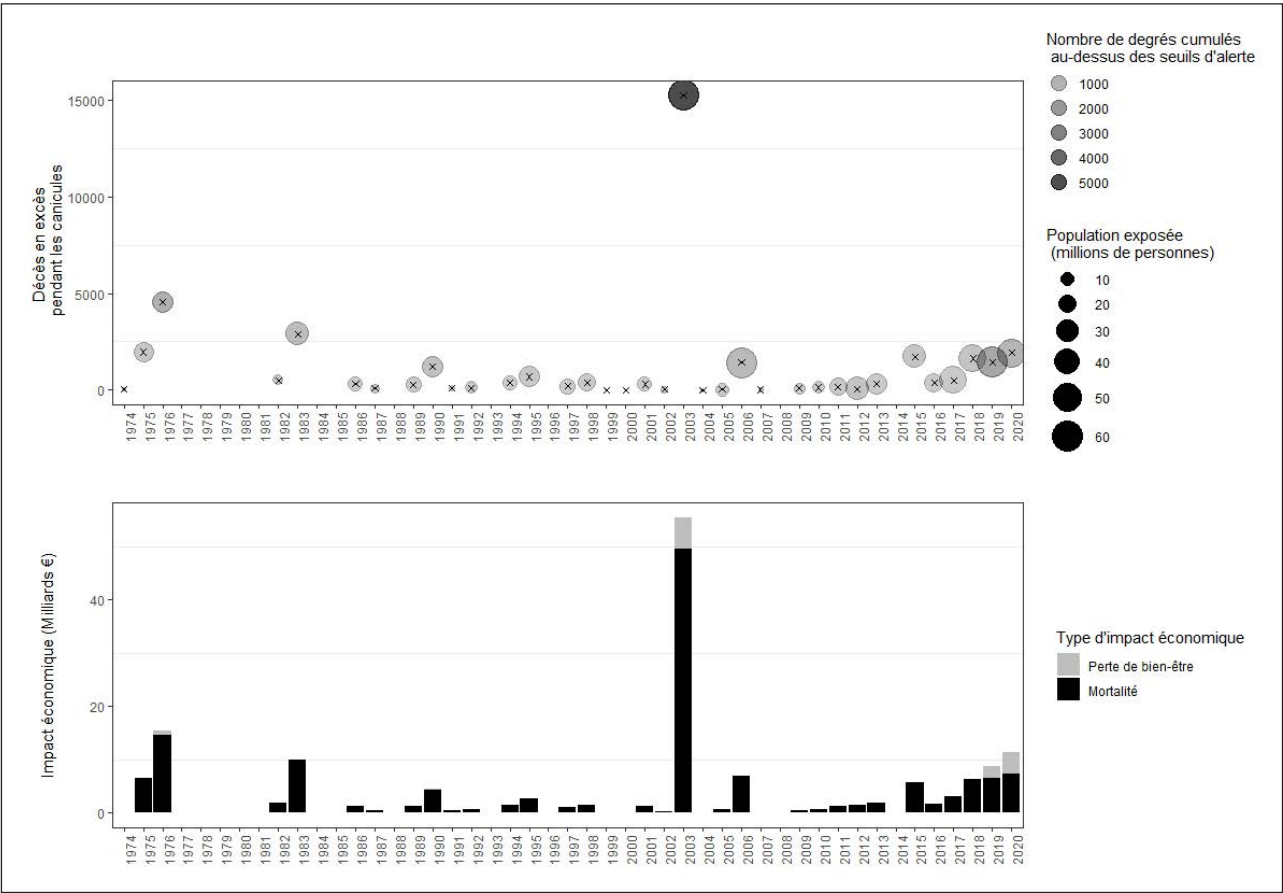


Figure 1 : Nombre des décès constatés en excès pendant les canicules et évaluations monétaires de la mortalité et des pertes de bien-être – Source : calculs des auteurs réalisés sur la base de données de température de Météo-France et de population de l'Insee.

million €₂₀₁₇) et, enfin, 3 millions d'euros depuis 2013 (Quinet, 2013), soit l'équivalent de 3,17 millions €₂₀₁₇. Cette croissance traduit des évolutions, tant au niveau national qu'international, dans les choix méthodologiques sous-jacents et dans ce qu'une société consent à payer pour réduire le risque de mortalité. Il ne nous est pas apparu opportun que ces évolutions viennent affecter notre exercice d'évaluation économique rétrospective des impacts des vagues de chaleur, en mêlant l'évolution de la VED et celle du nombre des décès. Nous avons donc choisi la VED correspondant à 3,17 millions €₂₀₁₇, actuellement recommandée en France, pour l'ensemble de la période 1974-2020.

Pour les pertes de bien-être, la valeur de 43 €₂₀₁₇ par jour d'activité restreinte a été retenue (Ready *et al.*, 2004), et donc appliquée pour toute la période d'étude, selon la même logique que pour la valorisation de la mortalité.

Enfin, **l'évaluation économique du recours aux soins** portant sur la sous-période 2015-2019 exprime en €₂₀₁₇ les coûts médicaux directs (passages aux urgences, consultations, hospitalisations), les coûts indirects (perte de production calculée sur la base du salaire brut journalier) et la composante intangible (établie sur la base du consentement à payer pour réduire le risque d'un passage aux urgences ou d'une hospitalisation).

Résultats

La partie supérieure de la Figure 1 ci-dessus représente pour les canicules observées au titre de chaque année leur intensité approchée (déterminée par le nombre cumulé de degrés Celsius (°C) se situant au-dessus des seuils par jour et par département), la population concernée et la mortalité associée. Elle illustre le caractère exceptionnel de la canicule de 2003 et souligne l'augmentation depuis les années 2010 du nombre des canicules et de l'importance de la population exposée à ces phénomènes.

La partie inférieure de cette même Figure 1 restitue les évaluations monétaires annuelles de la mortalité, lesquelles s'élèvent au total à 143 milliards €₂₀₁₇ pour l'ensemble de la période 1974-2020. On retrouve une évaluation économique de la mortalité plus importante pour les années marquées par un plus grand nombre de décès : 2003, 1976, 1983, 2006 et 2015-2020.

Les pertes de bien-être ont été prises en compte pour les périodes de vigilance rouge déclenchées en 2019 et 2020. Avant 2004, trois années auraient pu être potentiellement concernées par une vigilance rouge, et ont donc été, elles aussi, évaluées, sur la base d'une population faible en 1976 et 1990, mais plus importante en 2003. L'effet de la perte de bien-être sur la période

1974-2020 s'est élevé à 13 milliards €₂₀₁₇, dont 93 % se concentrant sur les seules années 2003, 2019 et 2020.

Enfin, sur la sous-période 2015-2020, la morbidité représentait environ 31 millions €₂₀₁₇ (dont 80 % pour la part associée aux hospitalisations), soit moins de 1 % de l'évaluation monétaire totale correspondant à cette période (Adélaïde *et al.*, 2021). Les canicules enregistrées en 2019 en représentent plus du tiers. Cela s'explique par leur profil particulier affectant plus fortement des personnes plus jeunes, avec des températures diurnes très élevées affectant les travailleurs, mais des températures nocturnes propices à la dissipation de la chaleur corporelle chez les plus âgés.

Discussion

Les canicules constituent un risque marqué par une évolution rapide au cours de la dernière décennie et par un impact sanitaire qui demeure conséquent malgré les efforts de prévention engagés. Cela se traduit par un fardeau économique conséquent pour le système de santé et la société française, dont la part majoritaire associée à la mortalité prématurée représente un poids sociétal souvent sous-estimé et invisible.

La canicule de 2003 et certaines des canicules enregistrées au cours des années récentes sont directement attribuables au changement climatique. Par exemple, il a été considéré que la vague de chaleur de juillet 2019 ne serait sans doute pas survenue en l'absence de changement climatique (fréquence de moins d'une fois tous les 1 000 ans) (Vautard *et al.*, 2019). Ainsi, les personnes décédées suite aux canicules récentes peuvent être considérées comme les premières victimes identifiables du changement climatique en France.

Quelques limites doivent cependant être soulignées. Tout d'abord, les vagues de chaleur se produisent sur de très courtes périodes et leurs effets sur la santé peuvent entraîner une congestion du système de santé, et donc une augmentation des coûts. Ensuite, seule une fraction des conséquences des vagues de chaleur a été étudiée dans cet article. Ainsi, par manque de données disponibles, n'ont pu être inclus dans notre étude les effets sur la santé mentale, la santé périnatale et la santé au travail, ainsi qu'une partie des effets cardiovasculaires et les pertes de productivité. La part de la morbidité reste donc sans doute sous-estimée. Enfin, plusieurs hypothèses ont été faites sur les aspects épidémiologiques (attribution de l'ensemble des cas aux vagues de chaleur, extrapolation des données sanitaires...) et monétaires (absence de valeurs dérivées d'études sur les canicules...) (Adélaïde *et al.*, 2021).

Le coût humain et financier souligne l'urgence de la mise en place d'actions concrètes d'adaptation à la chaleur et d'atténuation du réchauffement à venir. Il n'existe actuellement pas de consensus scientifique sur la possibilité d'une acclimatation physiologique et d'une adaptation spontanée de la population à la chaleur. Dans le monde, si plusieurs études documentent une diminution du risque de décès associé à une température donnée, cela semble être davantage le reflet d'une amélioration globale de la santé ou d'un recours

accru à la climatisation depuis les années 1970 que de notre acclimatation à la chaleur (Sheridan *et al.*, 2018). D'ailleurs, cette baisse du risque ne compense pas l'élévation des températures, et la fraction de mortalité attribuable à la chaleur augmente déjà dans certaines régions du monde (Zhao *et al.*, 2021).

L'adaptation est incontournable, d'autant que les effets sanitaires de la chaleur sont en partie évitables grâce à la mise en place d'actions simples, comme l'adoption de comportements préventifs. Les actions de prévention des conséquences sanitaires des vagues de chaleur, telles que le plan national Canicule, le système d'alerte et la sensibilisation sur les comportements protecteurs sont peu coûteuses et *a priori* efficaces (Toloo *et al.*, 2013). En France, la mise en place du système d'alerte Canicule et santé a coûté 287 000 € en 2005, et son fonctionnement annuel s'élève à 454 000 € (ONERC, 2009). Toutefois, les mesures comportementales ne suffiront pas à elles seules ; elles doivent être complétées par des mesures structurelles, comme l'organisation du travail, l'adaptation du logement et l'atténuation des îlots de chaleur urbains. Ces mesures nécessitent la mise en place de moyens plus coûteux, mais elles ont l'avantage de s'intégrer dans une approche globale de prévention et de promotion de la santé et d'atténuation du changement climatique. Ces investissements, réalisés dès maintenant, permettraient de réduire les dépenses de santé à plus long terme.

Pour conclure, la sensibilisation des décideurs publics sur l'urgence de la situation est un enjeu majeur de santé publique. Il leur incombe, en particulier, de protéger les populations les plus vulnérables, car les inégalités d'exposition à la chaleur (Dialesandro *et al.*, 2021) peuvent se combiner avec une plus grande sensibilité individuelle à la chaleur (Schmeltz *et al.*, 2016 ; Limaye *et al.*, 2020) et à un déficit d'information sur les comportements protecteurs (Bone *et al.*, 2018).

Références bibliographiques

- ADÉLAÏDE L., CHANEL O. & PASCAL M. (2021), "Health effects from heat waves in France: an economic evaluation", *The European Journal of Health Economics*, <https://doi.org/10.1007/s10198-021-01357-2>.
- ATIKI N., PASCAL M. & WAGNER V. (2019), « Influence de la chaleur sur quelques causes de recours aux soins d'urgence en France métropolitaine durant les étés 2015-2017 », *Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire* (1), pp. 9-14.
- ATWOLI L., BAQUI A. H., BENFIELD T., BOSURGI R., GODLEE F., HANCOCKS S., HORTON R., LAYBOURN-LANGTON L., MONTEIRO C. A., NORMAN I., PATRICK K., PRAITIES N., OLDE RIKKERT M. G. M., RUBIN E. J., SAHNI P., SMITH R., TALLEY N. J., TURALE S. & VÁZQUEZ D. (2021), "Call for emergency action to limit global temperature increases, restore biodiversity, and protect health", *The Lancet* 398(10304), pp. 939-941.
- BONE A. & O'CONNELL E. (2018), "Health and high temperatures", *Public Health* 161, pp. 117-118.
- CHENG J., XU Z., BAMBRICK H., SU H., TONG S. & HU W. (2019), "Impacts of exposure to ambient temperature on burden of disease: a systematic review of epidemiological evidence", *International Journal of Biometeorology* 63(8), pp. 1099-1115.

- DANTEC R. & ROUX J. (2019), *Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050 : urgence déclarée*, Sénat, Paris, 1:190.
- DGS (2009), « Impacts du changement climatique sur la santé en France : éléments de coûts ».
- DIALESANDRO J., BRAZIL N., WHEELER S. & ABUNNASR Y. (2021), "Dimensions of Thermal Inequity: Neighborhood Social Demographics and Urban Heat in the Southwestern US", *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(3), p. 941.
- FFA (2021), « Changement climatique : quel impact sur l'assurance à l'horizon 2050 ? », p. 32, <https://www.ffa-assurance.fr/file/3987/download?token=6egR1YDe>
- FOUILLET A., REY G., LAURENT F., PAVILLON G., BELLEC S., GUIHENNEUC-JOUYAU C., CLAVEL J., JOUGLA E. & HÉMON D. (2006), "Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France", *International Archives of Occupational and Environmental Health* 80(1), pp. 16-24.
- GASPARRINI A., GUO Y., HASHIZUME M., LAVIGNE E., ZANOBBETTI A., SCHWARTZ J., TOBIAS A., TONG S., ROCKLOV J., FORSBERG B., LEONE M., DE SARIO M., BELL M. L., GUO Y. L., WU C. F., KAN H., YI S. M., DE SOUSA ZANOTTI STAGLIORIO COELHO M., SALDIVA P. H., HONDA Y., KIM H. & ARMSTRONG B. (2015), "Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study", *Lancet* 386(9991), pp. 369-375.
- HANNA E. G. & TAIT P. W. (2015), "Limitations to Thermoregulation and Acclimatization Challenge Human Adaptation to Global Warming", *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12(7), pp. 8034-8074.
- IANPHI (2021), "IANPHI Roadmap for action on health and climate change – Engaging and supporting National Public Health Institutes as key climate actors".
- IPCC (2014), "Human Health: Impacts, Adaptation, and Co-Benefits. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability – Part A: Global and Sectoral Aspects", Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 709-754.
- IPCC (2018), "Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty".
- KOUSKY C. (2014), "Informing climate adaptation: A review of the economic costs of natural disasters", *Energy Economics* 46, pp. 576-592.
- LAAIDI K., MAZZONI M., PERREY C., BEAUDEAU P. & PASCAL M. (2019), « Canicule et personnes vulnérables : enquête sur les registres municipaux », 448, pp. 49-50.
- LANCET COUNTDOWN (2021), "Lancet Countdown Tracking the connections between public health and climate change", <https://www.lancetcountdown.org/2021-report/>
- LIMAYE V. S., MAX W., CONSTIBLE J. & KNOWLTON K. (2020), "Estimating The Costs Of Inaction And The Economic Benefits Of Addressing The Health Harms Of Climate Change", *Health Affairs* 39(12), pp. 2098-2104.
- MTES (2021), « Notice sur les méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport – Récapitulatif des instructions cadres de 1964 à 2005 ».
- ONERC (2009), "Climate Change: Costs of Impacts and Lines of Adaptation", Report to the Prime minister and Parliament.
- PASCAL M. (2010), « Impacts sanitaires du changement climatique en France. Quels enjeux pour l'InVS ? », p. 80.
- PASCAL M., LAGARRIGUE R., TABAI A., BONMARIN I., CAMAIL S., LAAIDI K., LE TERTRE A. & DENYS S. (2021), "Evolving heat waves characteristics challenge heat warning systems and prevention plans", *International Journal of Biometeorology* 65(10), pp. 1683-1694.
- PASCAL M., WAGNER V., CORSO M., LAAIDI K., UNG A. & BEAUDEAU P. (2018), "Heat and cold related-mortality in 18 French cities", *Environment International* 121, pp. 189-198.
- READY R., NAVRUD S., DAY B., DUBOURG R., MACHADO F., MOURATO S., SPANNINKS F. & RODRIQUEZ M. X. V. (2004), "Benefit Transfer in Europe: How Reliable Are Transfers between Countries?", *Environmental and Resource Economics* 29(1), pp. 67-82.
- ROMANELLO M., MCGUSHINA., DI NAPOLIC., DRUMMOND P., HUGHES N., JAMART L., KENNARD H., LAMPARD P., SOLANO RODRIGUEZ B., ARNELL N., AYEB-KARLSSON S., BELESOVA K., CAI W., CAMPBELL-LENDNUM D., CAPSTICK S., CHAMBERS J., CHU L., CIAMPI L. A., DALIN C., DASANDI N., DASGUPTA S., DAVIES M., DOMINGUEZ-SALAS P., DUBROW R., EBI K. L., ECKELMAN M., EKINS P., ESCOBAR L. E., GEORGESON L., GRACE D., GRAHAM H., GUNTHER S. H., HARTINGER S., HE K., HEAVISIDE C., HESS J., HSU S.-C., JANKIN S., JIMENEZ M. A. P., KELMAN I., KIESEWETTER G., KINNEY P. L., KJELLSTROM T., KNIVETON D., LEE J. K. W., LEMKE B., LIU Y., LIU Z., LOTT M., LOWE R., MARTINEZ-URTAZA J., MASLIN M., MCALLISTER L., MCMICHAEL C., MI Z., MILNER J., MINOR K., MOHAJERI N., MORADI-LAKEH M., MORRISSEY K., MUNZERT S., MURRAY K. A., NEVILLE T., NILSSON M., OBRADOVICH N., SEWE M. O., ORESZCZYN T., OTTO M., OWFI F., PEARMAN O., PENCHEON D., RABBANIHA M., ROBINSON E., ROCKLÖV J., SALAS R. N., SEMENZA J. C., SHERMAN J., SHI L., SPRINGMANN M., TABATABAEI M., TAYLOR J., TRINANES J., SHUMAKE-GUILLEMOT J., VU B., WAGNER F., WILKINSON P., WINNING M., YGLESIAS M., ZHANG S., GONG P., MONTGOMERY H., COSTELLO A. & HAMILTON I. (2021), "The 2021 report of the Lancet Countdown on health and climate change: code red for a healthy future", *The Lancet* 398(10311), pp. 1619-1662.
- SCHMELTZ M. T., PETKOVA E. P. & GAMBLE J. L. (2016), "Economic Burden of Hospitalizations for Heat-Related Illnesses in the United States, 2001-2010", *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13(9) 894.
- SHERIDAN S. C. & ALLEN M. J. (2018), "Temporal trends in human vulnerability to excessive heat", *Environmental Research Letters* 13(4) 043001.
- TOLOO G., FITZGERALD G., AITKEN P., VERRALL K. & TONG S. (2013), "Are heat warning systems effective?", *Environmental Health: A Global Access Science Source* 12(1) pp. 1-4.
- VAUTARD R., BOUCHER O., JAN VAN OLDENBORGH G., OTTO F., HAUSTEIN K., VOGEL M., SENEVIRATNE S., SOUBEYROUX J.-M., SCHNEIDER M., DROUIN A., RIBES A., KREIENKAMP F., STOTT P. & VAN AALST M. (2019), "Human contribution to the record-breaking July 2019 heat wave in Western Europe", <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/July2019heatwave.pdf>
- VICEDO-CABRERA A. M., SCOVONICK N., SERA F., ROYÉ D., SCHNEIDER R., TOBIAS A., ASTROM C., GUO Y., HONDA Y., HONDULA D. M., ABRUTZKY R., TONG S., COELHO M. S. Z. S., SALDIVA P. H. N., LAVIGNE E., CORREA P. M., ORTEGA N. V., KAN H., OSORIO S., KYSELÝ J., URBAN A., ORRU H., INDERMITTE E., JAAKKOLA J. J. K., RYTI N., PASCAL M., SCHNEIDER A., KATSOUYANNI K., SAMOLI E., MAYVANEH F., ENTEZARI A., GOODMAN P., ZEKA A., MICHELOZZI P., DE'DONATO F., HASHIZUME M., ALAHMAD B., DIAZ M. H., VALENCIA C. D. L. C., OVERCENCO A., HOUTHUIJS D., AMELING

C., RAO S., DI RUSCIO F., CARRASCO-ESCOBAR G., SEPOSO X., SILVA S., MADUREIRA J., HOLOBACA I. H., FRATIANNI S., ACQUAOTTA F., KIM H., LEE W., INIGUEZ C., FORSBERG B., RAGETTLI M. S., GUO Y. L. L., CHEN B. Y., LI S., ARMSTRONG B., ALEMAN A., ZANOBBETTI A., SCHWARTZ J., DANG T. N., DUNG D. V., GILLET N., HAINES A., MENGEL M., HUBER V. & GASPARRINI A. (2021), "The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change", *Nature Climate Change* 11(6), pp. 492-500.

WATTS N., AMANN M., ARNELL N., AYEB-KARLSSON S., BEAGLEY J., BELESOVA K., BOYKOFF M., BYASS P., CAI W., CAMPBELL-LENDRUM D., CAPSTICK S., CHAMBERS J., COLEMAN S., DALIN C., DALY M., DASANDI N., DASGUPTA S., DAVIES M., DI NAPOLI C., DOMINGUEZ-SALAS P., DRUMMOND P., DUBROW R., EBI K. L., ECKELMAN M., EKINS P., ESCOBAR L. E., GEORGESON L., GOLDER S., GRACE D., GRAHAM H., HAGGAR P., HAMILTON I., HARTINGER S., HESS J., HSU S. C., HUGHES N., JANKIN MIKHAYLOV S., JIMENEZ M. P., KELMAN I., KENNARD H., KIESEWETTER G., KINNEY P. L., KJELLSTROM T., KNIVETON D., LAMPARD P., LEMKE B., LIU Y., LIU Z., LOTT M., LOWE R., MARTINEZ-URTAZA J., MASLIN M., MCALLISTER L., MCGUSHIN A., MCMICHAEL C., MILNER J., MORADI-LAKEH M., MORRISSEY K., MUNZERT S., MURRAY K. A., NEVILLE T., NILSSON M., SEWE M. O., ORESZCZYN T., OTTO M., OWFI F., PEARMAN O., PENCHEON D., QUINN R., RABBANIHA M., ROBINSON E., ROCKLÖV J., ROMANELLO M., SEMENZA J. C., SHERMAN J., SHI L., SPRINGMANN M., TABATABAEI M., TAYLOR J., TRIÑANES J., SHUMAKE-GUILLEMOT J., VU

B., WILKINSON P., WINNING M., GONG P., MONTGOMERY H. & COSTELLO A. (2021), "The 2020 report of The Lancet Countdown on health and climate change: responding to converging crises", *The Lancet* 397(10269), pp. 129-170.

WHO (2021), "Zero regrets scaling up action on climate change mitigation and adaptation for health in the WHO European region", pp. 1-14.

ZHAO Q., GUO Y., YE T., GASPARRINI A., TONG S., OVERCENCO A., URBAN A., SCHNEIDER A., ENTEZARI A., VICEDO-CABRERA A. M., ZANOBBETTI A., ANALITIS A., ZEKAA., TOBIAS A., NUNES B., ALAHMAD B., ARMSTRONG B., FORSBERG B., PAN S. C., ÍÑIGUEZ C., AMELING C., DE LA CRUZ VALENCIA C., ÅSTRÖM C., HOUTHUIJS D., DUNG D. V., ROYÉ D., INDERMITTE E., LAVIGNE E., MAYVANEH F., ACQUAOTTA F., DE'DONATO F., DI RUSCIO F., SERA F., CARRASCO-ESCOBAR G., KAN H., ORRU H., KIM H., HOLOBACA I. H., KYSELÝ J., MADUREIRA J., SCHWARTZ J., JAAKKOLA J. J. K., KATSOUYANNI K., HURTADO DIAZ M., RAGETTLI M. S., HASHIZUME M., PASCAL M., DE SOUSA ZANOTTI STAGLIORIO COELHO M., VALDÉS ORTEGA N., RYTI N., SCOVRONICK N., MICHELOZZI P., MATUS CORREA P., GOODMAN P., NASCIMENTO SALDIVA P. H., ABRUTZKY R., OSORIO S., RAO S., FRATIANNI S., DANG T. N., COLISTRO V., HUBER V., LEE W., SEPOSO X., HONDA Y., GUO Y. L., BELL M. L. & LI S. (2021), "Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modelling study", *The Lancet Planetary Health* 5(7), pp. 415-425.

Les effets du changement climatique : quelle adaptation pour les territoires littoraux ?

Par Patrick BAZIN

Directeur de la gestion patrimoniale au Conservatoire du littoral

Le littoral est un milieu mouvant soumis aux forces considérables de la mer, du vent et des fleuves côtiers. Au fil des siècles, l'homme a cherché à maîtriser ces dynamiques naturelles et à fixer les rivages. Aujourd'hui, la logique s'inverse : avec l'élévation progressive du niveau de la mer, la gestion du littoral ne peut plus tout miser sur la défense rigide du trait de côte.

Face aux incertitudes, une nouvelle ingénierie de la gestion des territoires littoraux se dessine, laquelle doit intégrer différentes disciplines en matière d'expertise, différentes stratégies dans le temps et des gouvernances réinventées.

Les considérations développées dans cet article proviennent pour l'essentiel des enseignements tirés du projet Adapto mené par le Conservatoire du littoral depuis 2018. Elles concernent avant tout les secteurs littoraux peu urbanisés. Certaines d'entre elles peuvent trouver une application aux secteurs plus aménagés et habités, mais les enjeux qui s'y attachent sont sans commune mesure, et la transposition ne va donc pas de soi.

Les aléas du changement climatique sur le littoral

Le littoral étant le lieu de rencontre de la terre et de la mer, l'élévation du niveau marin y sera sans nul doute l'effet le plus notable du changement climatique. La communauté scientifique s'accorde sur le caractère inéluctable d'une telle élévation – et désormais d'un accroissement des événements météorologiques extrêmes –, mais souligne les incertitudes concernant l'ampleur, la vitesse et la distribution géographique de ces phénomènes.

Ces incertitudes n'empêchent cependant pas d'effectuer des projections sur l'avenir, car la forme globale de la courbe est connue :

- l'élévation actuelle du niveau marin est un fait constaté, mais elle s'opère à un rythme encore faible (de 20 cm depuis la fin du XIX^e siècle, elle progresse actuellement de 3,7 mm/an¹), avec des variations régionales importantes dues à la configuration des mers et des océans, ainsi qu'aux phénomènes de subsidence ou, au contraire, d'exhaussement de certains zones terrestres.

- au-dessus de 2°C de réchauffement climatique, l'élévation du niveau de la mer augmentera inévitablement dans les prochaines décennies et restera forte pendant plusieurs siècles² : à l'échéance de 2300, par exemple, cela signifie qu'en l'absence de politiques climatiques, le niveau marin pourrait monter jusqu'à 6,8 m, et peut être même davantage.

Un tel horizon est certes lointain, mais il est à mettre en rapport avec l'histoire des derniers siècles : depuis environ 6 000 ans, le niveau marin varie peu sur Terre et le développement de l'humanité sur le littoral n'a connu que cette stabilité.

Le phénomène est donc encore lent, mais va impacter sérieusement l'avenir des littoraux, dans un mouvement durable qui appellera, à chaque étape, l'adoption de réponses qui n'auront qu'un caractère transitoire face aux nouvelles évolutions.

Les impacts sur le littoral

Les côtes françaises réagiront différemment aux aléas marins selon leur nature géomorphologique. Trois types de côtes peuvent être distingués de ce point de vue.

¹ GIEC, 2021.

² GIEC, 2021.

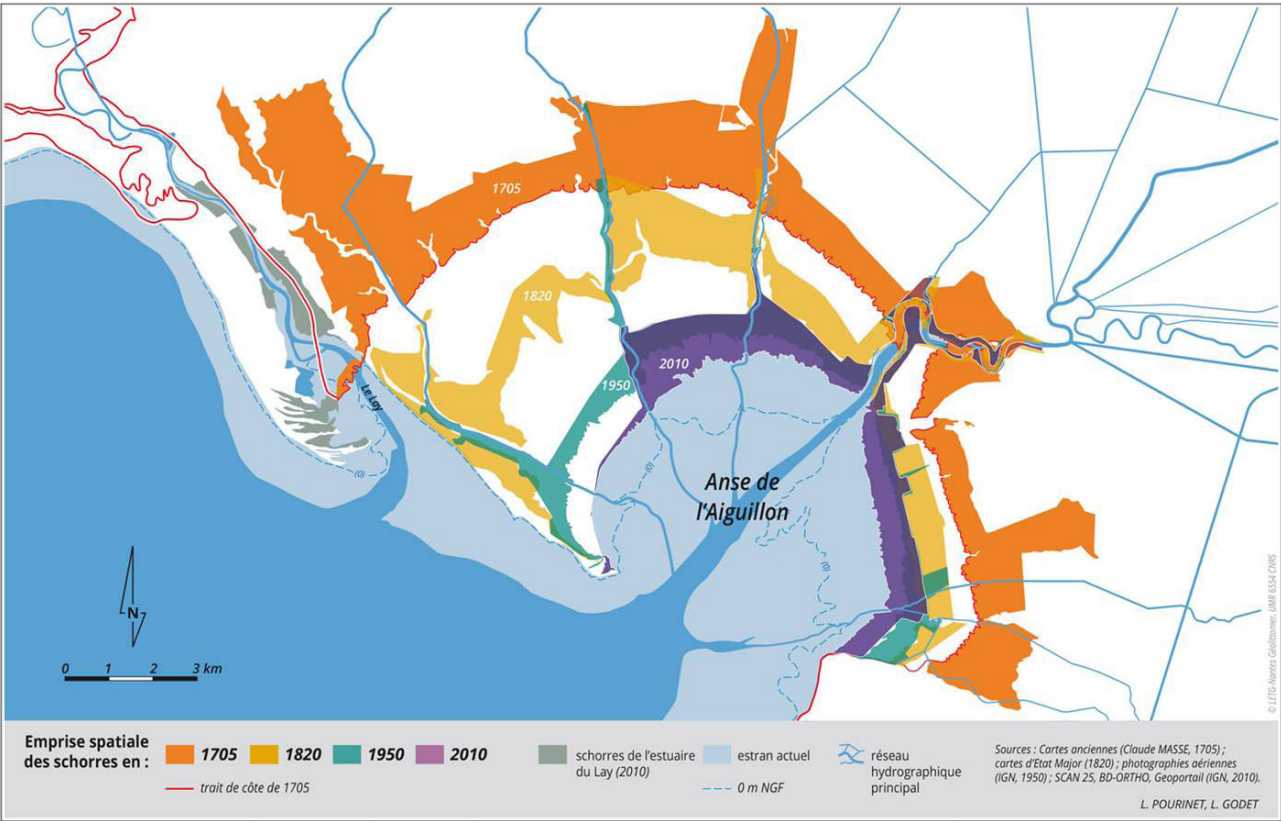


Figure 1 : Évolution du trait de côte du marais poitevin entre 1705 et 2010.

**Les côtes rocheuses
(environ 40 % du linéaire côtier)**

Les côtes rocheuses combinent souvent stabilité et altitude, ce qui les préserve mieux des aléas d'érosion et de submersion marine. Selon la dureté de la roche, une érosion plus ou moins rapide de celle-ci s'opère, ce qui se traduit par l'apparition de falaises. Celles-ci évoluent, le plus souvent lentement, mais les risques d'éboulements augmentent avec l'élévation du niveau de la mer. L'évaluation de ces risques déterminera les stratégies à appliquer, qui consisteront la plupart du temps à choisir entre deux options : préparer la relocalisation des enjeux les plus directement exposés ou réaliser des défenses lorsqu'elles peuvent l'être à des coûts raisonnables.

**Les côtes basses abritées
(25 % du linéaire côtier)**

De nombreux golfes et débouchés de fleuves faiblement exposés à l'énergie marine et qui présentaient un caractère maritime au début de l'ère chrétienne, ont été progressivement comblés par les apports sédimentaires. En France, les plaines maritimes flamandes et picardes, les estuaires des grands fleuves, les marais atlantiques (cotentin, breton, poitevin, charentais...) ainsi que la Camargue relèvent de cette dynamique. Dans ces espaces spécifiques, l'homme a accompagné le comblement naturel en effectuant des « prises » successives sur la mer, délimitées par des digues en terre. Plusieurs rangs de digues peuvent ainsi être observés dans certains territoires littoraux, où ils encadrent des

prises, renclôtures ou polders constituant des surfaces salinières, conchylicoles ou agricoles de grande qualité. En France, le mouvement s'est poursuivi jusque dans la deuxième moitié du XX^e siècle.

Situés à un niveau voisin de celui de la mer, ces territoires sont particulièrement sensibles aux aléas de submersion. Leur surface est évaluée à 600 000 ha en France hexagonale³, soit l'équivalent d'un département comme l'Eure ou la Savoie.

Au-delà des aléas de submersion, ces secteurs sont également confrontés aux avancées du biseau salé dans les sols et aux difficultés croissantes d'évacuation des excès d'eau vers la mer au fur et à mesure que le niveau de celle-ci s'élève.

**Les côtes sableuses
(35 % du linéaire côtier)**

Les côtes sableuses correspondent à des niveaux d'énergie marine intermédiaire et représentent un stock de sable hérité pour l'essentiel de la transgression flandrienne⁴. Ce matériau est à l'origine de rivages très dynamiques soumis aux variations saisonnières et interannuelles des courants ainsi qu'aux effets des tempêtes. La mobilité des côtes sableuses est spectaculaire et les hommes ont longtemps évité de s'y implanter ou se sont résignés à reculer face aux caprices de

³ CETMEF (2012), « Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux ».

⁴ PASKOFF Roland (1993), *Côtes en danger*, Paris, éd. Masson.

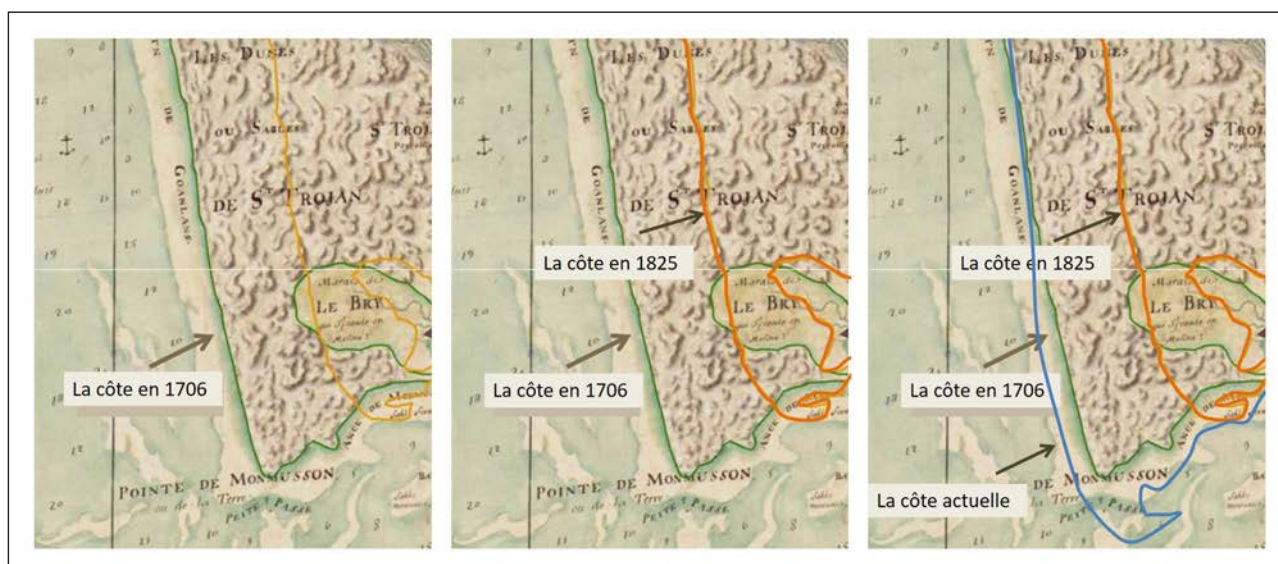


Figure 2 : Évolution dynamique des rivages des pertuis charentais depuis 1700 (réalisée par l'auteur d'après une illustration de Frédéric Pouget de l'Université de La Rochelle).

l'évolution des dunes. Une vaste entreprise de fixation des dunes, à partir du XIX^e siècle, a permis d'accueillir les installations de stations balnéaires littorales en plein développement, notamment après la Seconde Guerre mondiale. Ces implantations, par nature, « bâties sur du sable » se retrouvent très exposées aux effets du changement climatique.

Enfin, les côtes sableuses et les côtes basses sont parfois mêlées, la dune faisant office de rempart pour un territoire gagné sur la mer. Les aléas d'érosion et de submersion se trouvent alors liés.

Quelques démarches d'adaptation

La gestion des risques naturels littoraux

La gestion des risques littoraux a connu une très nette accélération depuis une dizaine d'années, à la suite de la tempête Xynthia. Celle-ci a révélé d'importantes faiblesses sur le littoral : des systèmes de digues peu connus et mal entretenus, des responsabilités insuffisamment identifiées. Une clarification juridique est intervenue en 2014 avec la loi « Gemapi » (gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations), qui confie aux collectivités intercommunales le soin de définir, de constituer et d'entretenir les systèmes d'endiguement destinés à protéger les territoires exposés, pour un niveau d'événement qu'elles déterminent. Les programmes d'action et de prévention des inondations (PAPI), validés et accompagnés financièrement par l'État à hauteur de 40 %, sont l'outil central de cette politique et couvrent désormais l'essentiel des zones basses du littoral. Ils déterminent les « défenses contre la mer », le plus souvent sur la base du trait de côte actuel. Mais certains d'entre eux commencent à intégrer de possibles évolutions futures dans la configuration des rivages, dans un but d'adaptation.

La stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte (SNGITC)

Plus directement liée à l'aléa d'érosion, la SNGITC a été adoptée par le gouvernement en 2012 et vient d'être entérinée par la loi Climat et Résilience de 2021. Cette stratégie repose sur deux axes : en premier lieu, l'amélioration des connaissances et, en second lieu, l'adoption de principes d'adaptation. En termes de connaissances, il s'agit de favoriser le déploiement d'observatoires côtiers, qui, intégrés au sein d'un réseau national, vont permettre de caractériser la vulnérabilité des rivages face aux aléas actuels et futurs. En termes d'adaptation, cette stratégie recommande l'étude et l'expérimentation d'opérations de relocalisation des enjeux les plus exposés, marquant une mise à distance vis-à-vis du principe de consolidation *a priori* des défenses. La loi Climat et Résilience ouvre des perspectives – qui devront être précisées par ordonnance – en matière d'outils destinés à accompagner les collectivités dans la mise en œuvre de ces projets de relocalisation.

Le programme Adapto

Le Conservatoire du littoral, par une maîtrise foncière publique, préserve les zones naturelles du littoral pour la richesse qu'elles présentent en termes de biodiversité, la beauté de leur paysage et les bénéfices socio-économiques qu'elles apportent. Avec 15 % du linéaire côtier français placés sous sa responsabilité, le Conservatoire du littoral est en première ligne dans les actions à mener pour faire face à l'élévation annoncée du niveau de la mer.

Si le domaine qu'il administre présente des enjeux moins importants qu'ailleurs en termes de risque d'atteinte aux vies humaines et aux activités économiques, l'imbrication de ces différents espaces au sein de bassins exposés aux aléas marins justifie, et impose même, la participation de cet établissement aux réflexions collectives sur ce sujet.

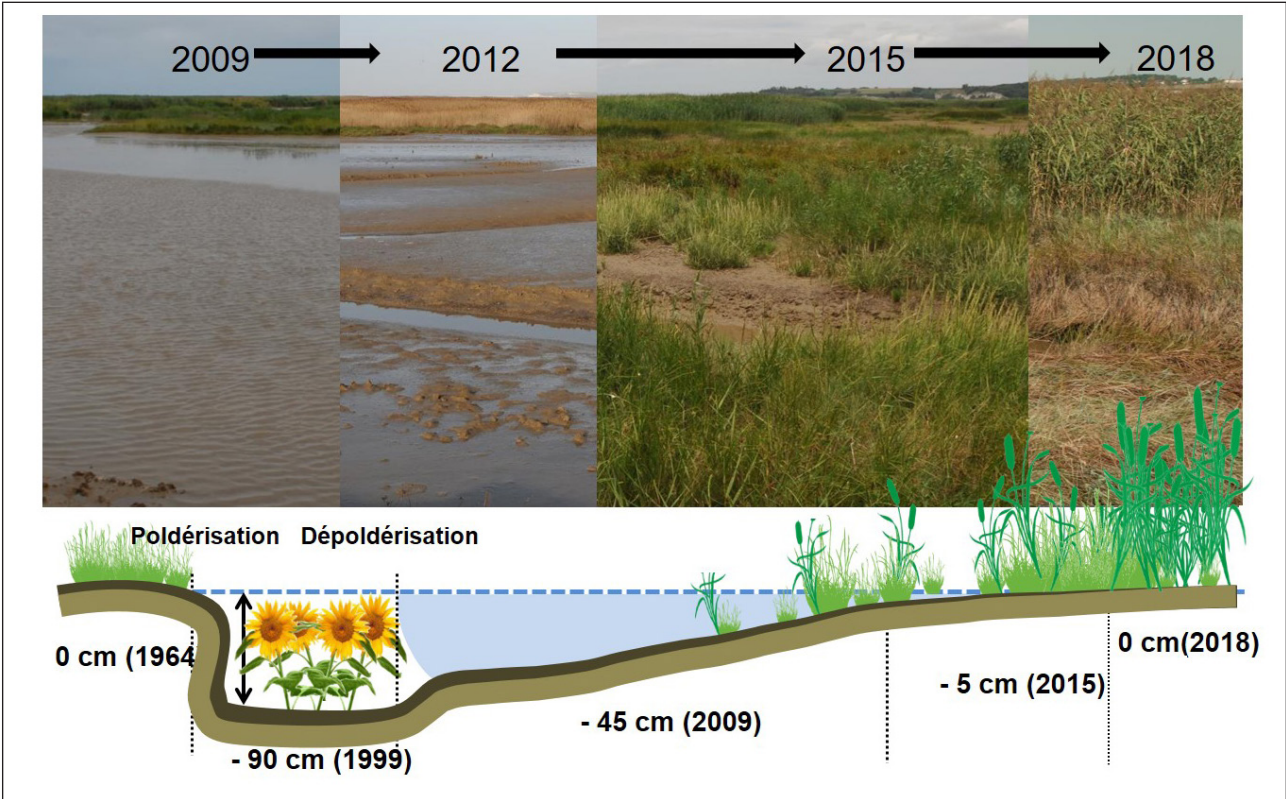


Figure 3 : Évolution topographique du polder de Mortagne-sur-Gironde entre 1960 et 2020 – Source : Life, Adapto, Conservatoire du littoral et BRGM.

Le Conservatoire s’efforce depuis plus d’une quinzaine d’années d’apporter sa contribution à ce débat complexe. Il place son action dans le cadre de la Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte, considérant les fluctuations de la côte comme un phénomène naturel qu’il faut laisser évoluer dans la mesure de l’acceptable et dans le respect de la sécurité des personnes.

Décidé à faire la preuve par l’exemple de la pertinence de cette approche, le Conservatoire a initié plusieurs projets, dont le programme Adapto (« dix démarches de gestion souple du trait de côte ») qui est devenu opérationnel en 2018.

Ces démarches visent à recréer des zones, libres ou encadrées, de dynamique littorale, constituant des atténuateurs des effets de l’élévation du niveau de la mer. La mobilité côtière, si elle peut être source d’incertitudes et d’inquiétudes, peut également se révéler très efficace pour amortir l’énergie générée par les phénomènes marins. Ces écosystèmes d’interface favorisent également la productivité biologique et les connexions terre-mer, ce sont aussi des puits de carbone efficaces. Ce sont, par exemple, les mangroves, dont les territoires ultramarins français sont richement dotés, ou les marais salés (ou schorres), présents en limite supérieure des estrans des côtes basses. Ces écosystèmes

captent dix à vingt fois plus de carbone par unité de surface que les forêts tempérées⁵.

Un polder, qui est une zone endiguée gagnée sur la mer, ne reçoit plus les sédiments marins et ses sols se tassent avec les années. En cas de submersion, il peut favoriser l’avancée de la lame d’eau dans l’intérieur des terres⁶. Ce même polder, reconnecté à l’influence marine, voit sa topographie s’élever : à l’exemple de l’estuaire de la Gironde avec une élévation de 90 cm en vingt ans, soit un rythme bien supérieur à celle du niveau de la mer.

Les dunes ou les lidos sableux, par nature modelés par les influences marines, peuvent reculer, voire se rompre. Mais si le secteur permet ces mouvements sans que des enjeux importants soient affectés, il peut ainsi absorber une grande part de la force érosive de la mer sans altérations majeures. Si ce même secteur est fixé artificiellement, la force érosive va se déplacer et attaquer d’autres secteurs, potentiellement plus problématiques. Ainsi, le désenrochement d’une partie de la plage des Vieux Salins, à Hyères (département du Var),

⁵ Commissariat général au développement durable (2019), « L’évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques (EFESE) – La séquestration du carbone par les écosystèmes français ».

⁶ Ou, selon la configuration, être utilisé comme bassin d’amortissement de l’onde de marée.

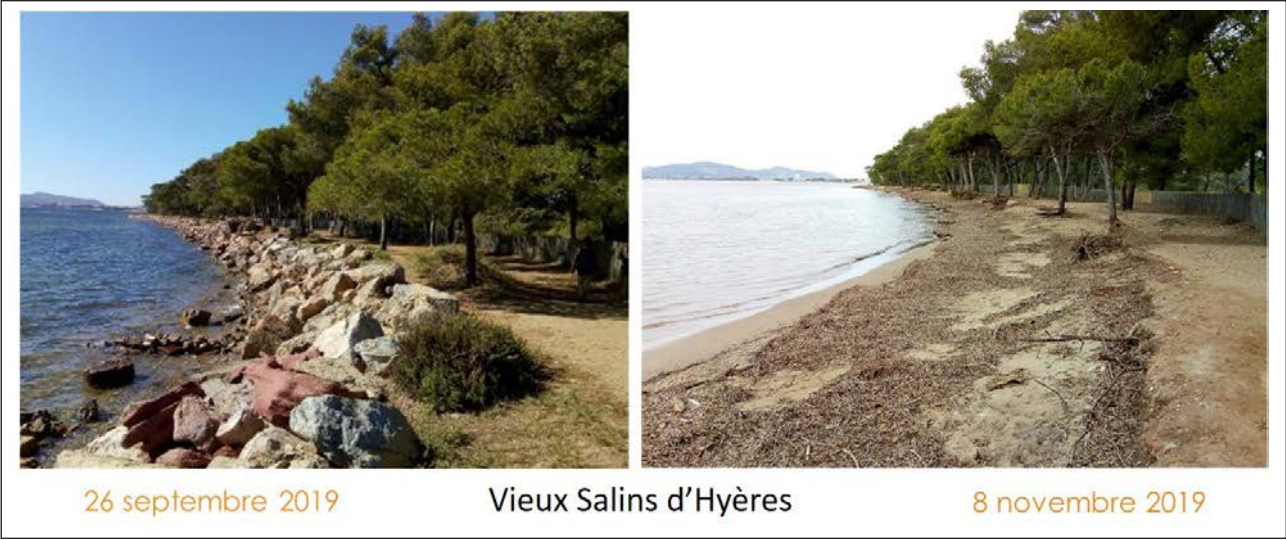


Figure 4 : Travaux de désenrochement du lido des Vieux Salins d'Hyères – Source : Life, Adapto, Conservatoire du littoral et BRGM.

semble contribuer à atténuer les attaques érosives qui affectent le village du même nom⁷.

Les démarches Adapto, comme tout projet de territoire impliquant de nombreuses parties prenantes, sont menées en parfaite liaison avec les acteurs locaux et nécessitent des études scientifiques approfondies et le recours à des techniques rigoureuses. Compte tenu de leur caractère innovant, les solutions proposées doivent démontrer leur robustesse sur plusieurs plans :

- la gestion des risques naturels : les aléas sont caractérisés avec l'aide du BRGM et les scénarios évalués

sur la base d'un large éventail d'hypothèses allant du maintien de la ligne actuelle jusqu'à différentes options de recomposition du paysage littoral ;

- la préservation du patrimoine naturel : le Muséum national d'Histoire naturelle développe un dispositif permettant de comparer les milieux naturels résultant des différents scénarios ;
- l'économie : cette approche est indispensable pour assurer la maîtrise des coûts et des investissements. Elle permet également d'apprécier les avantages comparatifs des scénarios à l'échelle des territoires en termes de services écosystémiques et d'attractivité ;

⁷ Pour davantage d'éléments, voir le site dédié à ce projet : www.lifeadapto.eu

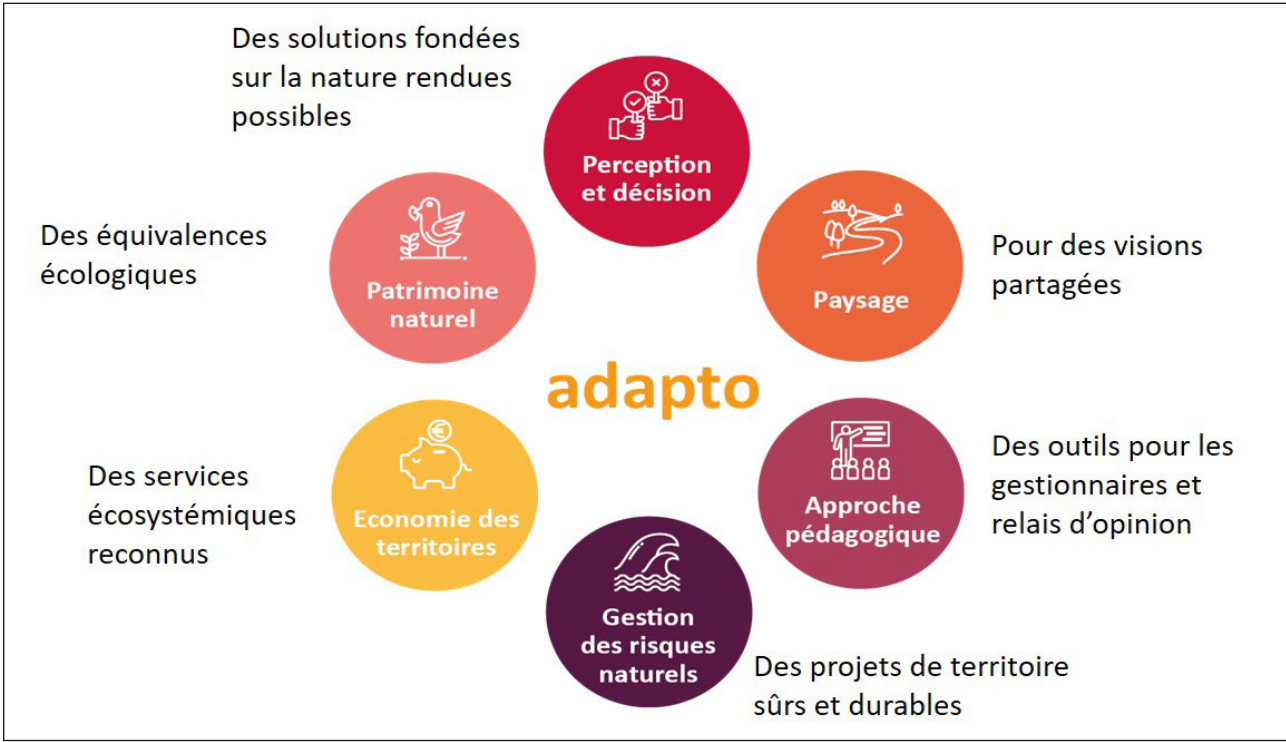


Figure 5 : Les approches disciplinaires du projet Adapto – Source : Life, Adapto, Conservatoire du littoral et BRGM.

- la gouvernance : bien que concernant majoritairement des sites propriété du Conservatoire du littoral, les démarches sont concertées autant que faire se peut avec non seulement les acteurs institutionnels mais aussi la société civile concernée localement. Elles s'insèrent, le cas échéant, dans les démarches existantes (les programmes d'actions de prévention des inondations (PAPI), notamment).

Enfin, le programme développe, en partenariat notamment avec les centres permanents d'initiation à l'environnement (CPIE) et l'École de paysage de Versailles, une batterie d'initiatives visant à sensibiliser et à informer les différents publics. L'approche paysagère occupe une place particulière : les représentations paysagères permettent à tous les interlocuteurs d'échanger sur les situations passées, actuelles et futures. Elles facilitent ainsi la définition d'un projet de territoire partagé.

Quelques réflexions pour conclure

Compte tenu de l'ampleur des phénomènes à venir, la question de l'adaptation côtière est encore largement devant nous. Pour nous y préparer au mieux, des points durs restent à résorber⁸.

Sur le plan financier

La politique de prévention des submersions s'appuie sur un mécanisme de financement efficace, ce qui n'est pas le cas pour la gestion de l'érosion côtière. Bien que ces phénomènes soient souvent liés, des nuances dans la qualification des aléas⁹ justifient une gestion différente des dommages. Pour les actions de prévention et d'aménagement, un schéma comparable à celui des PAPI (financements apportés à hauteur de 40 % par l'État et de 60 % par les collectivités) manque en revanche pour les projets de relocalisation côtière porteurs d'avancées en matière d'adaptation.

En matière juridique et administrative

La « théorie du mouvement » qu'impliquent les solutions d'adaptation basées sur les milieux naturels s'accorde mal de l'application habituelle des politiques sectorielles, qui sont, elles, fondées sur le zonage statique des enjeux et des règles. Pourtant, l'avenir du littoral sera fait d'horizons temporels en perpétuelle évolution, exigeant des adaptations régulières. La loi Littoral, pour laquelle la distance par rapport à la mer est un des paramètres majeurs, est de ce fait particulièrement interrogée. Si le rivage bouge, les effets de la loi changeront eux aussi. Plutôt que la bande des 100 mètres, ne faut-il pas aujourd'hui considérer la « bande des 100 ans » ? La récente loi Climat et Résilience ouvre des perspectives dans ce sens.

Sur les plans culturel et psychologique

L'aménagement des côtes a connu un essor considérable depuis un siècle, alors même que les phénomènes météorologiques se faisaient relativement rares. Cela a instauré un sentiment d'immunité vis-à-vis des aléas marins et la conviction d'un trait de côte à jamais fixé¹⁰. Malgré le retentissement d'un événement comme Xynthia, les solutions de recomposition du littoral, parfois aussi appelées « recul stratégique », peuvent être ressenties comme une menace pour le développement urbain et susciter des résistances d'ordre psychosocial.

Pour toutes ces raisons, une posture d'anticipation et d'adaptation n'est pas facilement justifiable auprès des citoyens. Quelques actions simples peuvent être promues dans ce but :

- reconnaître à nouveau au littoral sa nature instable et mouvante et l'étudier comme tel pour gérer au mieux les incertitudes qui l'entourent ;
- travailler à réduire l'écart de temporalité entre les enjeux de valorisation à court terme et les changements d'ampleur à venir, et ce malgré un calendrier mal défini ;
- faire de chaque territoire littoral exposé un territoire d'adaptation en le dotant de toutes les capacités d'expertise et d'animation nécessaires.

⁸ Les développements qui suivent sont issus de la réflexion personnelle de l'auteur et n'engagent donc que lui.

⁹ La submersion et l'éboulement sont des risques ; l'érosion n'est en revanche pas considérée comme tel.

¹⁰ Pour s'en convaincre, lire « La tempête Xynthia face à l'histoire », Emmanuel Garnier et Frédéric Surville (dir.), Le croît vif, 2010.

Résilience des systèmes électriques face au changement climatique

Par Alain BURTIN et Sylvie PAREY

EDF R&D

La question de la résilience des systèmes électriques face aux risques météo-climatiques est une question fondamentale pour la sécurité de l'alimentation en électricité et pour assurer une fourniture de qualité. Les systèmes électriques actuels ont été développés sur la base de référentiels climatiques issus de l'observation historique des phénomènes météo-climatiques. Le changement climatique en cours nous conduit à réinterroger la pertinence de nos référentiels à l'aune des évolutions en cours du climat et des projections climatiques futures réalisées dans le cadre des travaux du GIEC. Dans cet article, nous abordons l'exemple du système électrique français sur la base des études menées par EDF R&D dans le but de caractériser les évolutions du climat et leurs impacts potentiels sur le système électrique, avant de nous intéresser à la démarche d'adaptation engagée en son sein par le groupe EDF.

Systèmes électriques et risques climatiques

La question des risques climatiques n'est pas une problématique nouvelle pour les systèmes électriques : la maîtrise de ces risques est fondamentale pour la résilience de ces systèmes face aux événements extrêmes, et ainsi assurer la sécurité de l'alimentation en électricité et en garantir une fourniture de qualité.

Les systèmes électriques sont fortement exposés aux conditions climatiques et aux effets associés : ainsi, le fonctionnement du circuit de refroidissement des centrales de production est dépendant de son alimentation en eau de mer ou en eau des rivières, ou en air dans le cas du recours à des aéroréfrigérants. De même, la production des énergies renouvelables (l'hydraulique, l'éolien ou le solaire) est évidemment étroitement liée à la ressource en eau, en vent ou en ensoleillement. Plus globalement, la fiabilité de tous ces systèmes repose sur la résilience des réseaux de distribution et de transport aux conditions climatiques.

La gestion des risques climatiques fait partie intégrante des processus de conception des ouvrages et des procédures d'exploitation de ceux-ci, ainsi que de la gestion de l'équilibre offre-demande et de celle de la ressource en eau. L'approche adoptée face à ces risques repose sur des référentiels statistiques représentatifs de la variabilité des phénomènes climatiques historiques pour lesquels on dispose de mesures réalisées sur de longues périodes, ainsi que sur la caractérisation des événements extrêmes auxquels les ouvrages et les systèmes électriques doivent pouvoir résister.

Par ailleurs, les usages de l'électricité et de l'énergie sont eux-mêmes dépendants des conditions climatiques : la demande d'électricité est ainsi fortement influencée par la température (en France, 1°C en moins en hiver implique un appel de puissance supplémentaire de l'ordre de 2 400 MW à l'heure de pointe. La sensibilité estivale est moindre mais est devenue significative, de l'ordre de 400 à 500 MW par degré supplémentaire à la pointe).

La prise en compte des phénomènes météorologiques est essentielle dans la gestion de l'équilibre offre-demande des systèmes électriques, sachant que l'électricité ne se stocke pas et qu'il est dès lors nécessaire d'ajuster à chaque instant l'offre à la demande en gérant notamment les impacts des aléas météorologiques sur la disponibilité des ressources¹ et des équipements. Cela nécessite de disposer des marges suffisantes en termes de capacités installées pour pouvoir faire face aux situations extrêmes, et faire en sorte de limiter le risque de défaillance du système, ce qui peut conduire, le cas échéant, à des délestages de consommation.

L'exposition des systèmes électriques aux aléas climatiques constitue ainsi un des facteurs essentiels du dimensionnement des mix électriques : historiquement, en France, l'aléa prépondérant était l'aléa hydraulique qui conduisait à dimensionner le parc thermique pour faire face aux années sèches. Le développement des usages thermosensibles a conduit progressivement à rendre prépondérant l'aléa de température et à dimensionner le parc thermique pour faire face aux vagues de froid extrême, le critère de 3 heures par an en espérance a été défini pour faire face à un risque de vague

¹ Par exemple, contrainte sur la disponibilité du gaz en période de vague de froid.

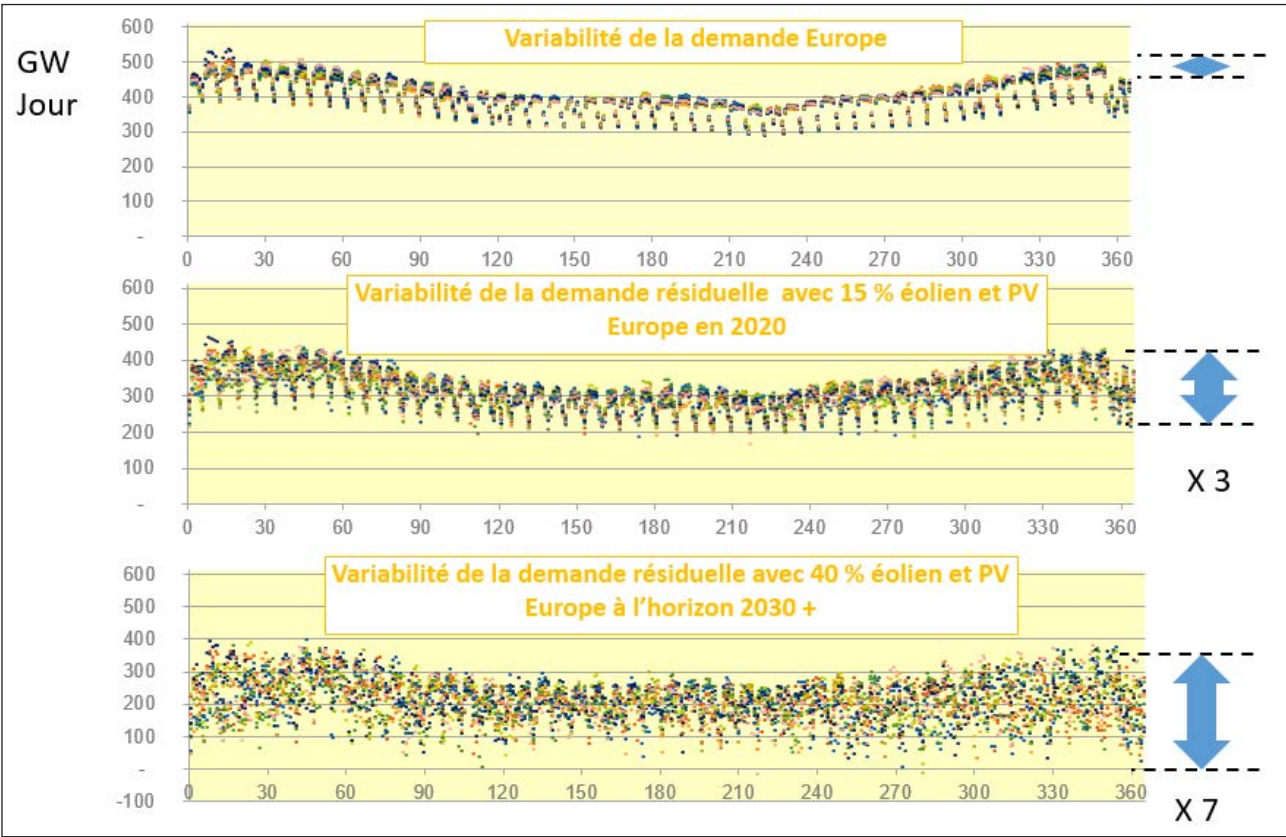


Figure 1 : Variabilité de la demande d'électricité – Source : EDF R&D.

de froid qui ne se réalise statistiquement qu'une fois tous les dix ans².

Le développement massif des énergies renouvelables (éolien, photovoltaïque) modifie en profondeur les fondamentaux de la gestion de l'équilibre offre-demande ainsi que le paysage des risques de défaillance en France et en Europe. La variabilité de la production éolienne tend à devenir le principal aléa pesant sur la gestion physique de l'équilibre offre-demande à la maille européenne. Le premier graphique de la Figure 1 (voir ci-dessus) restitue la variabilité journalière de la demande d'électricité en Europe en fonction de la température pour les 365 jours de l'année sur 30 années climatiques représentatives, avec des périodes critiques concentrées sur les pointes mobiles en hiver. Le deuxième graphique illustre pour 2020 la variabilité journalière en Europe de la demande résiduelle d'électricité une fois défalquée la production d'origine renouvelable : il est à noter que cette variabilité augmente tout au long de l'année.

Le troisième graphique donne une projection de cette variabilité à l'horizon des 10 ans, laquelle montre

la forte montée en puissance des énergies renouvelables. Il est également constaté une exposition croissante du système électrique aux phénomènes météo-climatiques, laquelle s'accompagne d'une évolution du « paysage de défaillance », ce qui pose la question du critère d'ajustement du parc thermique. L'une des situations potentiellement critiques est celle d'une vague de froid extrême s'accompagnant de vents faibles et touchant simultanément et pendant plusieurs jours un grand nombre de pays européens durant la période hivernale. Estimer la fréquence de survenue de ce type de situation nécessite de pouvoir disposer d'un important jeu de données, allant bien au-delà du simple recul observationnel dont on dispose pour la période historique.

Les impacts du changement climatique

Le constat

Le changement climatique est une réalité déjà tangible pour les systèmes électriques. Ses effets font l'objet de nombreux travaux au niveau international.

Le changement climatique auquel nous assistons actuellement est sans précédent à une échelle de temps aussi courte. Le rapport du groupe de travail I du 6^e rapport d'évaluation du GIEC (IPCC, 2021) indique que le changement climatique a déjà conduit à l'augmentation de près de 1,1°C de la température moyenne

² Ce critère correspond à une durée moyenne de défaillance annuelle de trois heures intervenant pour des raisons liées au déséquilibre entre l'offre et la demande d'électricité. Ce critère a été défini à l'échelle du système électrique dans le cadre d'un processus de planification centralisé. Dans le cadre d'un marché, cela pose la question de la gestion décentralisée par les acteurs de leur exposition aux risques climatiques sur leur périmètre d'équilibre.

globale par rapport à la période préindustrielle et a entraîné un recul global des glaciers, une hausse de 20 cm du niveau global de la mer, ainsi que l'augmentation de la fréquence des vagues de chaleur et de la proportion des cyclones tropicaux les plus intenses.

Ces évolutions se déclinent, pour la France, au travers d'une augmentation de la température moyenne, qui est plus forte que celle constatée au niveau global et qui est plus marquée en été qu'en hiver, ainsi que d'une aggravation des risques de canicule et de sécheresse. Les régions de moyenne montagne et la zone méditerranéenne sont particulièrement touchées. Ces changements vont se poursuivre dans le futur, de façon d'autant plus importante que les émissions de gaz à effet de serre générées par les activités humaines seront moins maîtrisées.

L'adaptation au changement climatique nécessite de faire évoluer nos référentiels pour améliorer la gestion des risques climatiques. Par exemple, la filière Hydro et barrages s'est dotée récemment de plusieurs référentiels relatifs à la question de l'évaluation des impacts du changement climatique et de la résilience climatique des ouvrages hydrauliques (barrages et réservoirs). Ces guides n'ont pas de valeur réglementaire, mais tendent à s'imposer comme des standards internationaux de plus en plus systématiquement exigés par les bailleurs de fonds et les assurances. Nous citerons en particulier le référentiel de la Commission internationale des grands barrages ou encore le guide de l'International Hydropower Association.

Une veille scientifique continue

La prise en compte quantitative du changement climatique dans nos analyses est conditionnée par notre capacité à évaluer les évolutions du climat, sachant qu'en la matière, la science progresse régulièrement. Les modèles climatiques globaux sont de plus en plus complexes et performants, mais leur résolution spatiale reste trop large pour pouvoir donner une bonne représentation des particularités régionales et locales du climat et de ses évolutions. À cette fin, les climatologues ont développé des approches dites de descente d'échelle dynamique conduisant à se focaliser sur une région du globe à des résolutions spatiales bien plus fines, de l'ordre de quelques kilomètres, et en appliquant un modèle global pour alimenter le modèle régional à ses limites.

Les modèles actuels permettent ainsi, en affichant un certain degré de confiance, de réaliser des projections de l'évolution, en termes d'intensité, de fréquence et de distribution géographique et temporelle, de certains phénomènes climatiques (la modélisation reste en revanche encore hors de portée pour nombre d'autres phénomènes climatiques).

Les projections d'augmentation des températures de l'air et de l'eau, d'élévation du niveau marin ou de diminution du volume annuel de l'écoulement hydraulique font l'objet d'un consensus, avec toutefois des variabilités au niveau régional ou local. On constate déjà une modification de la saisonnalité des débits des rivières dans les zones montagneuses, avec des pics de débit

en avance de phase de 3 à 4 semaines sur certains bassins. Il faut également s'attendre à des étiages estivaux plus marqués et plus longs.

Il reste difficile en revanche d'identifier des évolutions quantifiables sur le territoire national en ce qui concerne la modification des régimes de vent, le changement de nébulosité, les tempêtes, les tornades, la foudre, ou la modification des précipitations extrêmes et des débits exceptionnels des fleuves. S'agissant du potentiel solaire, les modèles fournissent des réponses parfois différentes selon les simulations climatiques considérées. Pour l'éolien, les résultats divergent aussi en fonction des études et des régions. En Europe, des diminutions sont attendues dans le Sud, tandis que de faibles augmentations sont anticipées en Europe du Nord et en Europe centrale.

Enfin, les modèles ne remettent pas en cause l'existence d'épisodes de températures froides, de frasil et de neige. Le récent grand froid observé au Texas en 2021 questionne cependant sur notre capacité de résilience à des épisodes de froid intense tels que l'on a pu connaître dans le passé, mais auxquels nous ne sommes plus habitués.

Un article paru en 2020 dans *Nature Energy* (Yalew et al., 2020) procède à une revue d'études parues entre 2002 et 2019 et relatives à l'impact du changement climatique sur le secteur de l'énergie. Les aspects les plus étudiés sont les impacts de ce changement sur l'hydroélectricité. Viennent ensuite les impacts sur le système énergétique en général, puis les impacts sur la demande en matière de chauffage et de climatisation, où sont notamment montrées une diminution des besoins de chauffage en hiver et une augmentation des besoins de climatisation en été.

La démarche d'adaptation adoptée par le groupe EDF

La sensibilité du système électrique aux variations climatiques explique l'engagement précoce d'EDF R&D, dès 1990, dans des projets de recherche collaboratifs élaborés autour du changement climatique. Ces travaux visent à anticiper à court, moyen et long termes les évolutions des phénomènes climatiques, ainsi que certains des aléas indirectement associés au changement climatique, comme la prolifération d'espèces invasives, la dégradation de la qualité de l'air, le déclenchement de feux de forêt, les glissements de terrain, etc.

Pour quantifier les impacts du changement climatique, le groupe EDF s'est doté d'un service climatique qui regroupe des projections climatiques issues des exercices internationaux et des outils qui, relevant de l'état de l'art, permettent d'en décliner les résultats à l'échelle de ses activités. Cette démarche vise à intégrer à la fois des scénarios très émissifs du type RCP8.5 ou SSP5-RCP8.5, en particulier pour les agressions externes subies par les ouvrages, et des scénarios du type 2°C ou 1,5°C, dans lesquels le risque climatique est maîtrisé.

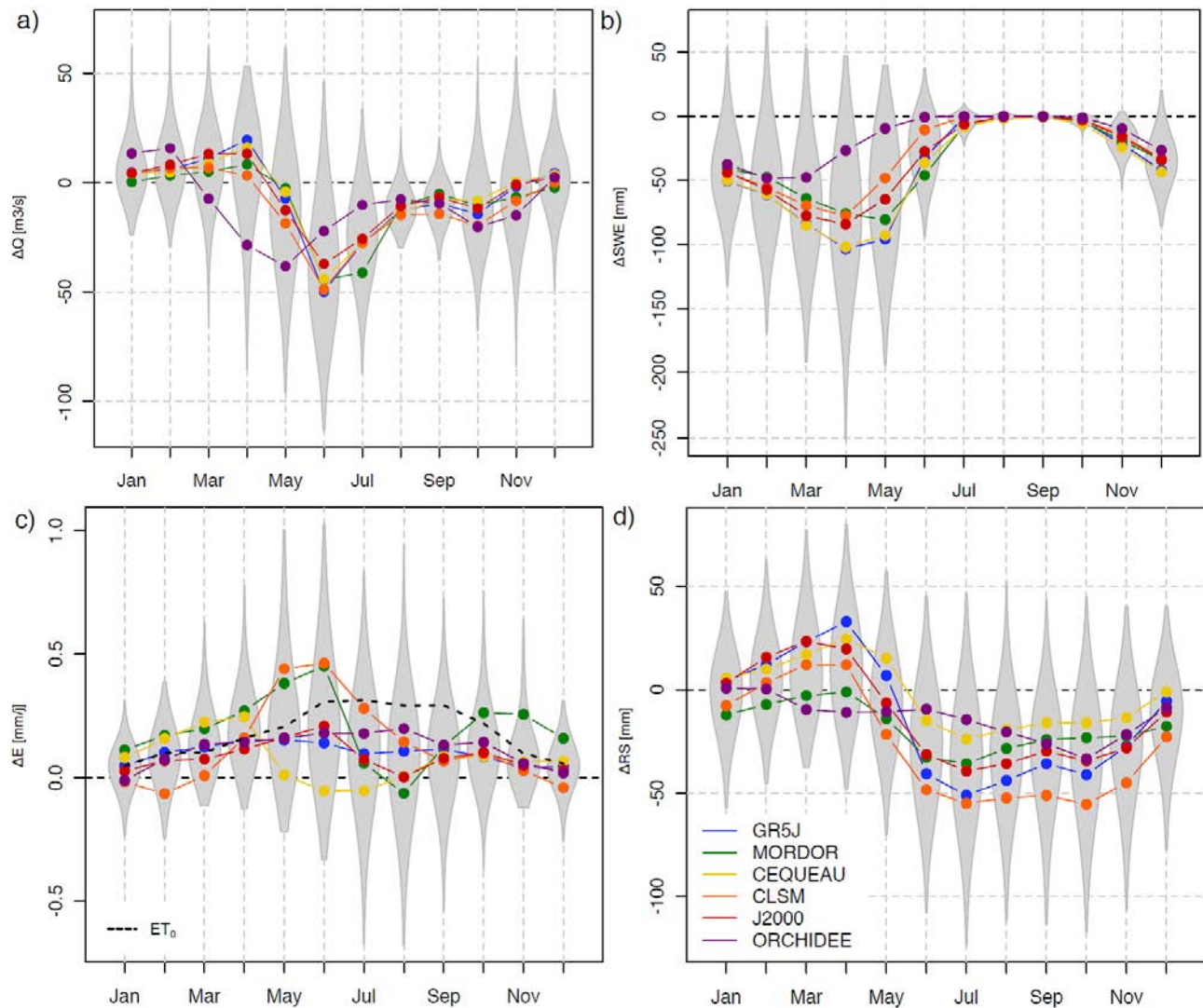


Figure 2 : Comparaison des résultats donnés par différents modèles hydrologiques (GR5J, MORDOR...) s'agissant des changements mensuels attendus à l'horizon 2050 en matière de : a) débit des rivières, b) de maximum de stock de neige, c) d'évapotranspiration réelle et d) de stock d'eau souterraine pour le bassin de la Durance à Serre-Ponçon. Les médianes de changements mensuels entre les périodes présentes et futures sont représentées par les lignes de couleur. Pour chaque mois, les distributions des changements mensuels, tous modèles confondus, sont représentées en gris par les diagrammes en violon – Source : Magand, 2014, projet R2D2 2050.

Les études réalisées ont démontré la robustesse du parc de production du groupe EDF, tout en identifiant les menaces potentielles à surveiller. Si le changement climatique mais aussi les autres changements anthropiques sont source supplémentaire d'incertitudes à prendre en compte dans nos évaluations, le principe d'un réexamen tous les dix ans de la sûreté des ouvrages nucléaires et hydrauliques est un pilier fondamental de cette robustesse sur le long terme.

Une étude publiée en 2021 (Parey et Marty, 2021) a permis d'analyser les évolutions à attendre à l'horizon 2050 pour cinq aléas majeurs susceptibles d'impacter le réseau de distribution d'électricité : les tempêtes, les précipitations extrêmes, la neige collante, les températures chaudes extrêmes et les feux de forêt. Concernant les trois premiers risques, aucune tendance à l'aggravation de ceux-ci n'est identifiée, si ce n'est l'aléa des pluies extrêmes dans la zone méditerranéenne, où il nous faut donc rester vigilants. En revanche, il faut se

préparer à être confrontés à des températures chaudes extrêmes possiblement supérieures de 5 à 10°C par rapport aux extrêmes historiques selon les modèles climatiques considérés (pour cette échéance, l'incertitude liée à la modélisation domine l'incertitude liée au scénario d'émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols) et à une extension à la fois de la saison propice et de la zone soumise au risque de feux de forêt. Ces résultats confortent les mesures d'adaptation déjà mises en œuvre par Enedis, qui consistent, par exemple, à remplacer les éléments sensibles à la chaleur et à enterrer les câbles dans les zones boisées.

L'adaptation au changement climatique fait aujourd'hui partie du périmètre couvert par le système de management environnemental du groupe EDF, lequel intègre l'élaboration de plans d'adaptation au changement climatique à l'échelle des différentes entités du groupe.

Références bibliographiques

MASSON-DELMOTTE V., ZHAI P., PIRANI A., CONNORS S. L., PÉAN C., BERGER S., CAUD N., CHEN Y., GOLDFARB L., GOMIS M. I., HUANG M., LEITZELL K., LONNOY E., MATTHEWS J. B. R., MAYCOCK T. K., WATERFIELD T., YELEKÇİ O., YU R. & ZHOU B. (2021), "Summary for Policymakers", In: "Climate Change 2021: The Physical Science Basis", Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.

PAREY S. & MARTY A. (2021), *Resilience Of The French Distribution Network To Climate Change: Projected Changes For Main Meteorological Hazards Around 2050*, CIRED conference, paper 0468.

YALEW S. G., VAN VLIET M. T. H., GERNAAT D. E. H. J. *et al.* (2020), "Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios", *Nat. Energy* 5, pp. 794-802, <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0664-z>

Bulletin CIGB/ICOLD n°169 (2017), « Évaluation des risques et opportunités climatiques pour les barrages et réservoirs ».

IHA (2019), "Climate Resilience Guide for the Hydropower Sector".

EDF R&D *et al.* (2018), *Les systèmes électriques de demain*, Paris, Lavoisier.

EDF R&D *et al.* (2021), *Les défis scientifiques du nucléaire*, Paris, Lavoisier.

Le changement climatique et ses conséquences économiques

Par Laurent MONTADOR

Directeur général adjoint de la Caisse centrale de réassurance (CCR)

Alors que les rapports successifs du GIEC consolident les projections relatives à l'évolution du climat à l'horizon 2050, la modélisation des impacts du changement climatique sur les événements climatiques extrêmes gagne en précision et en opérationnalité. Les modèles développés par la CCR depuis plus d'une quinzaine d'années permettent de disposer à l'échelle de la France d'une vision territorialisée de l'évolution potentielle du coût des catastrophes naturelles. Cette perspective d'évolution inquiétante pour la sécurité des personnes comme pour la résilience économique du pays mettra fort probablement en tension un régime d'indemnisation des catastrophes naturelles, qui fondé sur la solidarité nationale est unique en Europe. Face à ces évolutions, il n'est guère d'autre chemin que celui de l'adaptation, de la dynamisation des pratiques de prévention et du renforcement de l'efficacité des politiques publiques menées en la matière.

Introduction

Maillon essentiel de la gestion des risques par l'État, la Caisse centrale de réassurance (CCR) s'est dotée, depuis de nombreuses années, d'une chaîne de modélisation permettant de quantifier les conséquences économiques et financières des risques extrêmes.

Cette plateforme s'avère être indispensable pour accompagner l'État dans ses réflexions en matière de gestion des risques extrêmes et pour permettre l'efficacité des dispositifs d'indemnisation et de prévention des risques. Elle a pu être développée et enrichie au fil des ans grâce à des partenariats scientifiques avec des acteurs de référence en France, qu'il s'agisse de centres de recherche, d'universités ou de grandes écoles. Grâce à ces partenariats et aux retours d'expérience à la suite d'événements survenus dans le passé, les équipes de recherche et développement de la CCR contribuent à une amélioration continue des modèles et à renforcer la pertinence de ces derniers. Compte tenu du rôle central de la CCR en matière de couverture des risques de catastrophes naturelles, nos efforts se portent prioritairement sur ces derniers. Ces efforts plus que nécessaires dans un contexte de changement climatique, dont les premiers effets se font déjà sentir, visent à quantifier et si possible à réduire les nombreuses incertitudes en la matière.

Mais l'utilité de ces travaux va bien au-delà du seul régime d'indemnisation des catastrophes naturelles, servant en particulier à l'évaluation des conséquences du changement climatique sur le secteur agricole.

Dans cet article, nous dressons un bilan des travaux menés ces dernières années pour mieux évaluer l'impact du changement climatique et des enseignements qui en sont tirés pour appuyer les pouvoirs publics dans l'amélioration des politiques de prévention.

Modélisation du changement climatique

Les scénarios du GIEC

L'analyse du changement climatique ne peut s'effectuer sans faire référence aux scénarios de projections climatiques du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Ces scénarios permettent de structurer les études et les modélisations portant sur les catastrophes naturelles. L'année 2021 a été marquée par la publication du dernier rapport de ce groupe de travail, lequel fait état d'une augmentation significative du nombre des vagues de chaleur notamment en zone urbaine au cours des prochaines décennies. Dans le même temps, ce rapport alerte sur l'augmentation des précipitations extrêmes et des inondations consécutives dans le futur. La COP26, qui s'est tenue à Glasgow en novembre 2021, a une nouvelle fois rappelé l'urgence de maintenir le réchauffement climatique sous les 2°C d'ici à 2100 afin d'éviter un emballement climatique possible au-delà de ce seuil.

Pour rappel, les deux scénarios les plus importants sont le RCP4.5 et le RCP 8.5. Le premier correspond à une concentration de GES de ~ 500 ppm d'équivalents CO₂ en 2050 et de ~ 660 ppm en 2100, et à une augmentation des températures se situant entre 1,6 et 2,5°C en 2050 et entre 2,1 et 3,5°C en 2100. C'est un scénario qualifié d'optimiste, du fait qu'il prévoit une stabilisation des émissions de GES à un niveau faible jusqu'en 2050, puis une diminution de celles-ci jusqu'en 2100 (IPCC 2021).

Dans le scénario RCP8.5, les concentrations en GES évoluent fortement ; elles sont estimées à environ 600 ppm en 2050 et sont supérieures à 1 370 ppm en 2100. En termes d'augmentation des températures, les

estimations prévoient des hausses comprises entre 1,9 et 3,0°C en 2050 et entre 3,3 et 5,7°C en 2100 (IPCC 2021). Ce scénario est toujours considéré comme le plus pessimiste et correspond à une poursuite de l'augmentation des émissions de GES au rythme actuel.

Ces deux scénarios ont été retenus par Météo-France et la CCR pour réaliser leurs projections climatiques.

La méthode choisie

Le modèle Arpege-Climat de Météo-France

Développé depuis 1990 par Météo-France, le modèle Arpege-Climat est un modèle de prévision et d'évolution du climat à l'échelle mondiale. Ce modèle a ensuite été amélioré pour intégrer, notamment, les différents scénarios du GIEC précités.

Le modèle Arpege-Climat a été utilisé pour simuler 400 répétitions de l'année 2000 et 400 répétitions de l'année 2050 pour les deux scénarios 4.5 et 8.5. Cela permet de prendre en compte la variabilité climatique. Plus précisément, c'est la répétition des événements qui permet l'analyse des scénarios extrêmes en termes de fréquence et d'intensité. Arpege-Climat est couplé à Safran-ISBA, qui est un modèle sol-atmosphère permettant de calculer la teneur en eau du sol (Soil Wetness Index – SWI). La descente d'échelle s'effectue via une approche quantiles/quantiles appliquée à la base de réanalyse Safran pour les précipitations et le SWI.

Les données en sortie de ce modèle alimentent les différents modèles Cat développés par la CCR :

Données Arpege-Climat et Safran-ISBA-MODCOU (SIM2)	Modèles CCR
Précipitations	Inondations
Composantes horizontales de la vitesse du vent à 10 m	Submersion marine
Pression atmosphérique	Submersion marine
Indice d'humidité des sols (SWI)	Sécheresse géotechnique

Tableau 1 : Mise en relation entre les modèles développés par Météo-France et ceux de la CCR. À noter que le modèle SIM2 est alimenté par une dizaine de paramètres météorologiques issus des simulations climatiques et calculés sur une maille de 8 x 8 km sur la France métropolitaine avec un pas de temps horaire.

La chaîne de modélisation développée par la CCR

Les modèles de catastrophes, dits modèles « Cat », développés par le secteur de l'assurance, se composent généralement de trois modules :

- un module d'aléa, qui permet de simuler les événements climatiques. Il est couplé au modèle Arpege-Climat ;
- un module de vulnérabilité, qui intègre la localisation et la caractérisation des biens assurés, notamment leur valeur assurée, qui est le plus souvent estimée, ainsi que les projections de population à l'horizon 2050 ;
- un module de dommages, qui permet de traduire l'intensité de l'aléa pour chaque événement simulé. Les données sont croisées avec celles de vulnérabi-

lité, traduites en coût monétaire à l'échelle du bien, de la commune ou du territoire pris dans son ensemble.

Les modèles Cat de la CCR s'intéressent principalement aux périls couverts par le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles en vigueur en France : inondations (par débordement, ruissellement, remontées de nappes, submersions marines), sécheresse, mouvements de terrain, avalanches, séismes, tsunamis, volcanisme, cyclones et ouragans (vents cycloniques de vitesse supérieure à 145 km/h en moyenne sur 10 min ou à 215 km/h en rafales). Cette approche multi-périls permet de prendre en compte la dépendance entre les aléas climatiques et de produire des années climatiques qui incluent des épisodes de précipitations, de sécheresse ou de tempêtes extrêmes.

Projection des portefeuilles en 2050 tenant compte de l'inflation (étude 2018)

La valeur assurée des biens (habitations, commerces, entreprises) est un enjeu majeur de l'évaluation des dommages. L'estimation repose à la fois sur des données fournies par les assureurs et sur des algorithmes permettant de compléter ces dernières. Ainsi, les valeurs assurées des biens, y compris pour les portefeuilles d'assurance actuels, sont des estimations. La prise en compte de la projection des enjeux assurés aux mêmes horizons d'étude que celui des aléas est très importante pour appréhender au mieux l'exposition future de ces enjeux.

Le travail de projection réalisé a reposé sur l'évaluation de l'augmentation du nombre des risques assurés, leur répartition spatiale et l'estimation de l'évolution des valeurs assurées. Pour ce faire, les scénarios de projections démographiques de l'Insee ont été utilisés pour estimer le nombre des risques Particuliers et Professionnels en 2050, ainsi que leur valeur future possible.

Un scénario tendanciel a été utilisé pour estimer l'évolution des valeurs assurées. Il repose sur deux indicateurs : l'indice des prix à la consommation 1971-2017 et l'indice des prix à la construction 1974-2018. L'évolution moyenne annuelle de ces indicateurs est calculée sur plusieurs périodes de référence et est appliquée aux valeurs assurées actuelles. Après application des coefficients, on constate que les valeurs assurées pourraient atteindre 30 000 Mds€ en 2050 contre environ 14 000 Mds€ aujourd'hui. Bien sûr, cette augmentation des valeurs assurées se reflétera aussi dans une augmentation des primes d'assurance dommages.

Effet combiné de l'évolution de l'aléa et de la vulnérabilité : quelles conséquences économiques ?

Pour mesurer uniquement ces effets, il faut figer les valeurs assurées à leur valeur d'aujourd'hui. À climat actuel, les dommages cumulés des inondations, sécheresses et submersions marines s'élèvent en moyenne à 1 Md€ sur une année en métropole.

En tenant compte d'une évolution tendant à une concentration des enjeux assurés dans les zones à

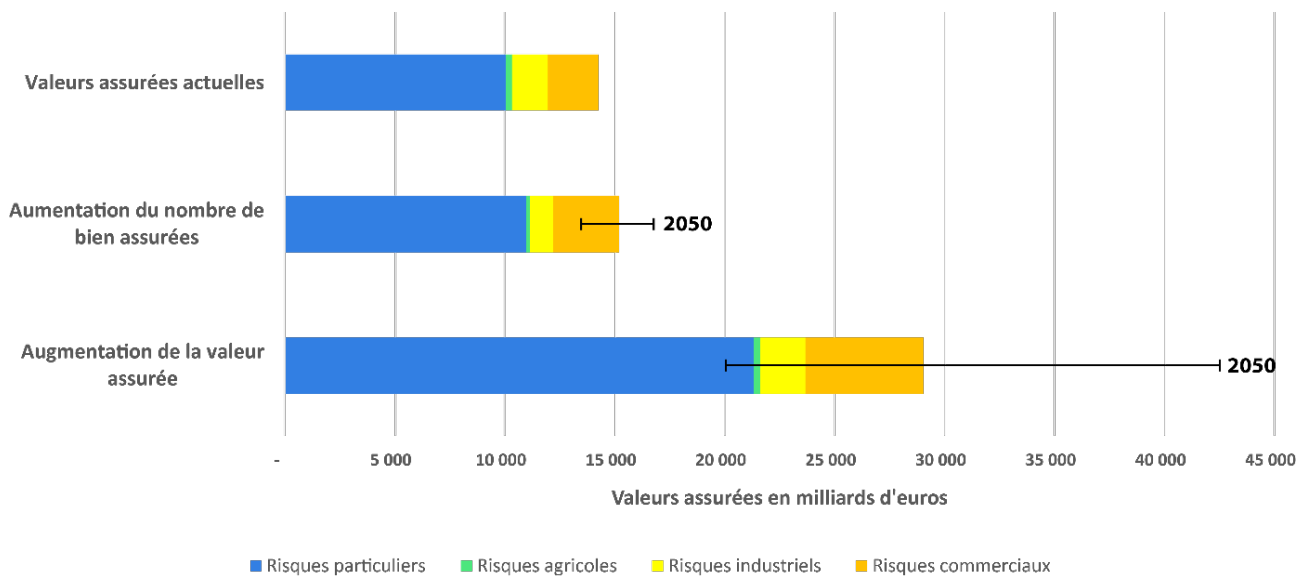


Figure 1 : Valeurs assurées estimées en France métropolitaine : portefeuille assuré actuel, avec intégration de l'évolution des biens assurés et des valeurs assurées tenant compte de l'inflation – Source : CCR.

risque, cette étude montre que la sinistralité augmenterait, à valeurs assurées constantes, de 50 % à l'horizon 2050 selon le scénario RCP8.5, pour atteindre 1,5 Md€ annuels. Ce chiffre est dû pour 35 % à l'évolution de la fréquence et de l'intensité des aléas climatiques et pour 15 % à la concentration des biens assurés dans les zones à risque. La sinistralité augmenterait de 35 % à l'horizon 2050 selon le scénario RCP4.5, avec 20 % dus à l'évolution de la fréquence des aléas et 15 % à la vulnérabilité. Néanmoins, de fortes disparités régionales sont observées selon l'évolution des dommages assurés à l'horizon 2050. En effet, les travaux réalisés montrent une augmentation accrue des dommages assurés sur le littoral atlantique (> 60 %) et l'Île-de-France (> 40 %). En revanche, sur le pourtour méditerranéen, l'évolution des dommages assurés seraient de « seulement » 30 %, tous périls confondus.

L'étude par aléa climatique souligne des territoires particulièrement exposés à certains périls. Les inondations engendrent une évolution des dommages assurés de + 60 % sur la façade atlantique et en Île-de-France et une diminution des pertes jusqu'à 25 % dans le Massif central.

Les submersions marines impactent particulièrement les départements de Vendée et de Charente-Maritime, et de manière moins importante le littoral méditerranéen. Les sécheresses géotechniques impactent l'ensemble du territoire de manière relativement homogène, contrairement à ce que l'on a pu observer dans le passé.

Si l'on tient compte de l'augmentation des valeurs assurées, telle que prévue par nos projections (de 14 000 à 30 000 Md€), la sinistralité augmentera proportionnellement pour atteindre 200 %, soit 3 Md€ de dommages moyens annuels.

Les territoires d'Outre-mer sont également fortement exposés, notamment aux cyclones. Ces événements peuvent avoir des impacts conséquents, avec des

pertes humaines et économiques majeures. Cela a notamment été le cas en 2017, avec le passage de l'ouragan Irma sur les îles de Saint-Martin et de Saint-Barthélemy, qui a causé 2 Md€ de dommages assurés. Depuis l'intégration en 2000 du péril vents cycloniques dans le régime Cat Nat, aucun événement de cette ampleur ne s'est produit. Il est précisé que si le cyclone Irma était passé sur la Guadeloupe, le coût des dommages assurés aurait dépassé les 10 Md€.

Une étude spécifique du risque cyclonique dans les Outre-mer a été menée en 2020. Elle a permis d'apporter des éléments de réflexion sur l'exposition de ces territoires aux événements extrêmes, à climat actuel et à climat futur. Les projections à horizon 2050 d'événements rares comme les cyclones souffrent de nombreuses incertitudes. L'interprétation des résultats d'Arpege-Climat à une échelle aussi large que des territoires comme les Antilles ou la Réunion n'a pas permis de conclure à une évolution de la fréquence de ces événements. En revanche, il a été possible de reconstituer des événements majeurs à partir des trajectoires simulées. Par exemple, pour la Guadeloupe, les pertes assurées résultant de cyclones de catégories 5/5+ se situent entre 12,1 et 18 Md€. La moyenne des scénarios est de 4,9 Md€.

Le régime Cat Nat couvre les dommages causés aux biens des particuliers, des entreprises et des collectivités. En revanche, il ne compense pas les pertes de récoltes subies par les agriculteurs. Celles-ci sont couvertes par d'autres dispositifs d'indemnisation, comme le Fonds national de gestion des risques en agriculture (FNGRA) et l'assurance Récoltes. Les agriculteurs sont particulièrement exposés au changement climatique. Compte tenu de son rôle de gestionnaire du FNGRA et de la mission de suivi du développement de l'assurance Récoltes que lui a confiée le ministère chargé de l'Agriculture, la CCR a également cherché à quantifier l'impact du changement climatique sur les pertes de récoltes.

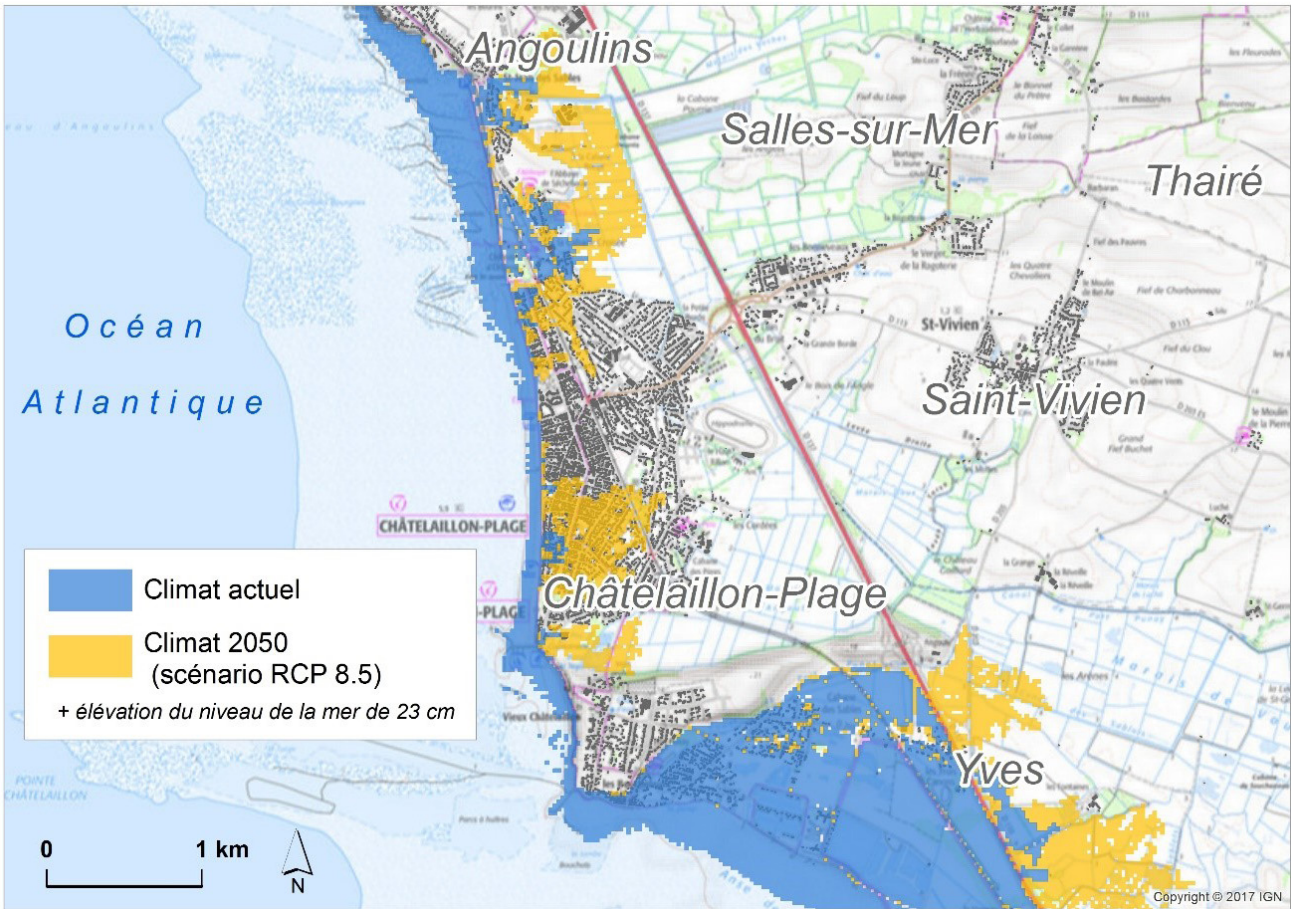


Figure 2 : Cartographie des zones susceptibles d'être inondées à la suite d'un événement centennal de submersion marine, à climat actuel et à climat futur intégrant une hypothèse d'élévation du niveau de la mer de 23 cm.

Les dommages aux récoltes agricoles

L'étude de modélisation et de projections climatiques réalisée par la CCR porte sur deux céréales à paille (le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver) et sur les prairies. Les céréales à paille sont sensibles aux extrêmes de sécheresse et aux excès d'eau. Les prairies, qui servent à l'alimentation du bétail, sont, quant à elles, principalement exposées aux sécheresses.

D'un point de vue historique, les sécheresses majeures ayant engendré le plus de pertes sont celles de 2003 et de 2011. Les pertes de production liées à la sécheresse de 2003 ont été, à l'échelle nationale, de 30 % pour les prairies et de 10 % pour le blé tendre d'hiver et l'orge d'hiver. En 2016, c'est l'excès d'eau qui a causé le plus de pertes pour les céréales, avec un taux de 28 % à l'échelle nationale.

Nos projections climatiques montrent que ces sécheresses extrêmes verraient leur période de retour, qui est aujourd'hui de 10 ans à climat actuel, passée à 6 ans à climat futur. Le déficit hydrique augmentera sur tout le territoire français métropolitain, s'accompagnant d'une augmentation des pertes de récoltes décennales de 35 % pour les prairies, et qui ira jusqu'à 75 % pour le blé tendre d'hiver et à 79 % pour l'orge d'hiver à l'échelle nationale. La moitié nord de la France semblerait devoir être plus impactée par cette évolution des sécheresses extrêmes que le sud de la France, même si le pourtour

méditerranéen enregistrera certainement des intensités de sécheresse plus élevées.

Quant aux excès en eau, les variabilités régionales sont très importantes. En effet, l'indice climatique enregistre une diminution de ses valeurs se situant entre 25 et 50 % sur le pourtour méditerranéen, alors que celles-ci sont en augmentation dans la moitié nord de la France.

Prévention : agir dès maintenant

Les conséquences du changement climatique sur l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des événements climatiques extrêmes viennent interroger les stratégies conduites par les acteurs privés comme les politiques publiques menées en matière de prévention des risques naturels majeurs. La première question qui se pose au regard des pratiques actuelles de prévention, porte sur la pérennité de leur efficacité face au dérèglement climatique à venir. Ce qui est efficace aujourd'hui le sera-t-il encore demain ? Ce qui renvoie à une question corolaire : sait-on mesurer l'efficacité des stratégies de prévention tant au regard des aléas du climat actuel que de ceux du climat futur ?

À ce niveau, la France est en train de se doter d'un dispositif permettant une évaluation exhaustive et régulière de l'efficacité des actions qu'elle mène pour prévenir les risques de catastrophes naturelles d'origine

climatique. Ainsi, en utilisant des modèles de simulation d'événements incluant ou non des ouvrages de prévention, la CCR peut mesurer les dommages évités grâce à des études dites « d'analyse coût-bénéfice ». La CCR a, depuis plusieurs années, initié des travaux sur ce sujet. Deux études réalisées ont ainsi porté sur la prévention des inondations et ont montré des résultats concordants.

La première étude a été une évaluation de l'impact des dispositifs de prévention des inondations sur la sinistralité communale au cours de la période 1995-2016

Trois dispositifs ont été étudiés : les plans de prévention des risques d'inondation (PPRI), les plans communaux de sauvegarde (PCS) et les programmes d'actions de prévention des inondations (PAPI). Les résultats des analyses statistiques conduites démontrent de manière significative l'impact positif des dispositifs étudiés sur la baisse de la sinistralité des communes qui en ont été dotés. La fréquence des sinistres et le ratio sinistres sur primes (S/P), en particulier, baissent de 50 % dans ces communes au cours de la période précitée, alors qu'aucun signal statistique n'est identifié sur les communes exemptes de ce type de dispositifs. Les mesures de prévention analysées ont ainsi contribué à contenir la croissance des dommages assurés liés aux inondations sur la période 1995-2016, à l'échelle nationale.

La seconde étude a porté sur les dommages que les lacs réservoirs du bassin de la Seine ont permis d'éviter lors de la crue de janvier 2018

Survenue en hiver et concernant la majeure partie du bassin de la Seine et de ses affluents, la crue de 2018 est d'une nature différente de celle de 2016, qui était plus lente mais aussi d'une durée plus longue. Les quatre lacs réservoirs situés en amont du bassin disposaient encore à la fin janvier d'importantes capacités de stockage, avec des prises d'eau renforcées grâce aux récents travaux réalisés sur le canal d'amenée Seine. Ces lacs ont ainsi pu être fortement mis à contribution. Ils ont ainsi permis de réduire significativement les hauteurs d'eau (jusqu'à 80 cm) en amont de la confluence de la Seine avec l'Oise et de préserver certaines villes de l'inondation (Saint-Dizier, Châlons-en-Champagne, Troyes)¹. La modélisation de l'impact de cette crue par la CCR a montré que les grands lacs de Seine ont ainsi permis de réduire les dommages d'au moins 30 %, soit une minoration de près de 90 millions d'euros du coût de l'événement Seine-Marne dans son ensemble.

Ces deux exemples illustrent l'efficacité des politiques publiques menées actuellement en matière de prévention des inondations dans les conditions actuelles du climat. Ils suscitent toutefois deux interrogations :

- celle de savoir dans quelle mesure cette efficacité va se trouver dégradée dans l'avenir par l'augmenta-

tion de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques ;

- celle de savoir si la France se prépare à cette dégradation attendue, notamment par la prise en compte de l'aggravation des aléas climatiques dans ses politiques de prévention.

La prise en compte du changement climatique dans les politiques publiques de prévention des risques naturels est aujourd'hui relativement circonscrite. Elle n'est effective que dans le cadre de la prévention des risques de submersion marine pour lesquels des aléas à climat futur peuvent être identifiés avec de relatives certitudes. Les plans de prévention des risques littoraux (PPRL), élaborés par les services de l'État, représentent ainsi dans les communes à risque une réglementation de l'occupation des sols pour partie fondée sur la prise en compte de l'aléa submersion à l'horizon 2100. Ces PPRL, couplés aux documents d'urbanisme locaux (plans locaux d'urbanisme et schéma de cohérence territoriale), constituent le principal levier de la prise en compte du changement climatique dans les politiques actuelles de prévention des risques naturels. Les études réalisées par la CCR sur l'exposition du territoire français à ces risques à l'horizon 2050 illustrent la nécessité de tenir compte dans les politiques publiques de prévention des impacts du changement climatique sur les phénomènes de sécheresse, de cyclone, de débordement des cours d'eau et de ruissellement.

Enfin, l'augmentation de la fréquence et de la sévérité des événements extrêmes du fait du changement climatique soulève une dernière question : celle du dimensionnement de la politique publique actuelle. Ou, pour être plus direct, en fait-on assez au regard de ce qui nous attend ?

En 2020, la CCR a réalisé, en collaboration avec la direction générale de la Prévention des risques du ministère de la Transition écologique, un important travail² destiné à rendre compte de ce que le Fonds de prévention des risques naturels majeurs (FPRNM) a permis d'impulser depuis sa création, en 1995. Cette analyse visait à mettre en perspective l'un des principaux pans de la politique publique de prévention des risques naturels au regard de l'exposition du territoire, des catastrophes passées et de celles à venir en lien avec le changement climatique. L'objectif final était d'apporter un éclairage quantifié permettant d'objectiver la pertinence des orientations prises en matière de prévention des risques naturels. Cette analyse a permis de montrer les forces de cette politique publique :

- qui parvient à mobiliser les énergies locales suite à la survenue de catastrophes naturelles *via* la mise en place de programmes d'actions de prévention des inondations (plus de 200 de ces PAPI couvrent le territoire national) ;
- qui investit massivement dans la prévention des inondations par débordement, phénomène qui a été

¹ *Bilan de la gestion des lacs réservoirs*, période du 17 au 31 janvier 2018, EPTB, p. 8.

² « La prévention des catastrophes naturelles par le Fonds de prévention des risques naturels majeurs – Éléments d'éclairage – Bilan 1995-2019 ».

le plus dévastateur par le passé et qui le sera plus encore en 2050 ;

- qui a su évoluer en intégrant de nouvelles façons d'agir (réduction de la vulnérabilité à l'échelle des logements individuels) et qui évolue encore aujourd'hui (expérimentation du financement du *build back better* dans les Landes et les Alpes-Maritimes).

La forte concentration du financement du FPRNM sur la prévention des inondations par débordement et des submersions marines est un atout pour l'adaptation du pays au changement climatique. Son corollaire, toutefois, est d'avoir conduit à une relative faiblesse des investissements en matière de prévention des risques d'inondation par ruissellement, de sécheresse géotechnique ou de cyclone. Certes, des réglementations imposant des prescriptions sur les constructions neuves ont vu ou verront le jour pour réduire la vulnérabilité des biens exposés aux sécheresses et aux cyclones³, mais celles-ci laisseront un « stock » important de biens inadaptés, ceux déjà construits dans les zones à risque.

Avec le risque de retrait-gonflement des argiles, le risque de ruissellement pluvial est probablement l'un de ceux qui mérite le plus l'attention des pouvoirs publics. À la différence des risques de débordement des cours d'eau et de submersion marine, le risque de ruissellement ne fait pas l'objet d'une cartographie exhaustive

des zones exposées. Ce déficit de connaissances et d'investigations empêche les services de l'État, comme ceux des collectivités, de pouvoir structurer l'aménagement du territoire en fonction de ce risque. Il résulte de ce constat qu'une part importante des sinistres (65 % en nombre et 52 % en coût⁴) se produit en dehors des zones de débordement des cours d'eau, celles faisant le plus souvent l'objet d'une cartographie officielle et d'une réglementation associée.

La première des voies de progrès au regard d'une meilleure prise en compte du changement climatique est ainsi celle de l'amplification « sans regret » des politiques existantes, de l'élargissement du champ des phénomènes qu'elles traitent et de l'amélioration de la connaissance des phénomènes impactés par l'évolution climatique. La prise en compte des aléas futurs (au-delà de ce qui est déjà fait pour la submersion marine) est probablement l'une des sources principales d'optimisation des politiques publiques. Celle-ci devrait permettre à terme, lorsque les incertitudes auront été suffisamment identifiées, de faire évoluer les outils de pilotage (analyse coûts-bénéfices), les dispositifs de régulation de l'urbanisme, le dimensionnement des ouvrages hydrauliques de protection et de canalisation, les réseaux d'eau pluviale et les moyens de la gestion de crise.

³ La loi ELAN de 2018 et ses textes d'application prévoient l'adaptation des constructions neuves dans les zones argileuses, tandis qu'une réflexion est en cours pour instaurer une réglementation paracyclonique dans les Outre-mer.

⁴ Période de référence : 1995-2019.

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

Environnement et santé : quels impacts, quelles gouvernances ?

Introduction

Anneliese DEPOUX, Robert BAROUKI et Maud DEVÈS

Généalogie du lien entre santé et environnement

Puissance publique et santé environnementale en France :
ruptures et mutations dans la longue durée

Pascal GRISET

Vers une médecine fondée sur l'idée de santé planétaire

Marie GAILLE

Environnement, écosystèmes et impacts sur la santé humaine

Serge MORAND



Octobre 2021

Les effets connus ou supposés de l'environnement sur la santé

Effets bénéfiques de l'environnement sur la santé en site urbain

Denis ZMIROU-NAVIER

Des risques avérés aux risques suspectés : particules atmosphériques
et nanoparticules manufacturées

Francelyne MARANO

L'évaluation des risques des pesticides : entre savoir réglementaire et science
académique

Laurence HUC et Jean-Noël JOUZEL

Environnement et pandémie

Impacts des pressions environnementales et des changements climatiques sur
la propagation des maladies infectieuses et sur la vulnérabilité des populations

Sébastien DENYS et Robert BAROUKI

Pollution atmosphérique et infections virales

Jorge BOCZKOWSKI

Changement climatique ou changement global, il faut choisir pour la santé !

Jean-François GUÉGAN

Santé et environnement : quelle gouvernance ?

Vers le développement d'un environnement plus favorable à la santé au sens
du concept international « Une seule santé »

Cédric BOURILLET

Faut-il fusionner les ministères chargés de l'Environnement et de la Santé ?

Essai d'analyse à la lumière de la fusion engagée en 2007 entre les ministères
chargés de l'Environnement et de l'Énergie

Richard LAVERGNE

La gestion du risque sanitaire en France : le défi de l'incertitude

William DAB

Le rôle d'une agence sanitaire face à la pandémie de Covid-19

Roger GENET

La santé environnementale : l'opportunité d'instaurer une gouvernance des
risques multidimensionnelle et intégrée

**Florence CARRÉ, Jacques GARDON, Maud DEVÈS, Laure GIAMBERINI,
Christian MOUGIN, Nicolas ECKERT et Gilles GRANDJEAN**

Vers une écologisation de la gouvernance de la santé

Nathalie BLANC

Ouverture internationale

To recover from Covid-19, we need to invest in a healthy and green future

Dr Maria P. NEIRA

Réglementation des substances chimiques : science et décision, lenteur et confusion

Laurence HUC et Robert BAROUKI

Santé-environnement : illustration de la politique du ministère de la Santé en matière de protection de la santé de la population face aux enjeux de notre
société

Pr. Jérôme SALOMON, Joëlle CARMÈS et Mathilde MERLO

Le dossier a été coordonné par **Robert BAROUKI, Anneliese DEPOUX et Maud DEVÈS**

Ce numéro peut être consulté et téléchargé gratuitement sur notre site

<http://www.annales.org>

Atténuation et adaptation : une course de vitesse face au temps

Par Hervé LE TREUT

Professeur à Sorbonne Université et à l'École polytechnique

En quelques années ou décennies, l'adaptation au changement climatique s'est imposée comme une nécessité indispensable face à un constat sans cesse grandissant, celui d'une maîtrise très insuffisante de nos émissions de gaz à effet de serre, ce qui nous éloigne toujours plus des scénarios de stabilisation proposés par les Accords de Paris. Les modalités de cette adaptation sont, en conséquence, elles-mêmes très contraintes. D'abord parce qu'il ne s'agit pas, bien sûr, d'entrer en compétition avec les actions d'atténuation, mais plutôt de déterminer ce qui est le dénominateur commun de ces deux approches. Et aussi parce que l'échelle des territoires, qui est souvent celle de l'adaptation, doit prendre en compte une réalité complexe, qui est celle du vivant, de la biodiversité comme des humains, que l'on a le devoir de protéger.

Introduction

La croissance, rapide et largement irrémédiable des émissions de gaz à effet de serre, a créé, en quelques décennies, une situation dont la nouveauté est généralement mal comprise. De fait, l'action de l'homme sur le climat a été caractérisée, au cours des dernières décennies, par des évolutions qui présentent deux particularités marquantes : une origine très récente et une croissance très rapide. Cette situation rend désormais impossible de considérer aujourd'hui l'enjeu climatique de la même manière qu'on le faisait il y a seulement vingt ou trente ans. Il s'agit désormais d'un problème dont la réalité ne souffre plus de doutes, et qui réclame des solutions nouvelles.

L'adaptation : une évolution nécessaire

Quelques éléments plus précis peuvent rappeler ce qu'a été cette évolution inexorable. C'est en 1957, seulement, qu'émergent les premières véritables alertes sur le climat, à travers les travaux des professeurs Revelle et Suess indiquant que les quantités de CO₂ émises dans l'atmosphère seraient suffisamment importantes pour pouvoir être décelées. C'est en 1979 qu'un autre résultat essentiel a été présenté à l'Académie des sciences américaine, par un chercheur très respecté, le professeur Charney, du MIT. Il s'est appuyé sur la première génération des modèles climatiques. Le rapport Charney s'est révélé visionnaire, en fournissant des résultats qui restent pertinents aujourd'hui. Mais il s'agissait alors d'anticiper des changements futurs, et c'est donc essentiellement sur des bases théoriques, de physique ou de géochimie, que se sont construites à cette époque les actions qui ont porté de manière préventive la problématique climatique.

La création d'un programme mondial de recherche sur le climat en 1980, celle du GIEC en 1988, le Sommet de la Terre de Rio en 1992, marqué par la création du Programme cadre des Nations unies sur le changement climatique : autant d'actes qui ont montré que les enjeux climatiques étaient pris au sérieux par une part dominante de la communauté scientifique.

Mais cette phase de développement de la prise en compte des enjeux climatiques est restée relativement invisible en dehors du monde scientifique spécialisé. Elle a atteint les « non-spécialistes » progressivement, à partir du milieu des années 1990, quand les manifestations de ces changements climatiques sont devenues visibles et mesurables de manière plus directe. Les émissions annuelles de CO₂ à l'échelle du globe sont aujourd'hui proches de 40 milliards de tonnes, contre 10 milliards en 1960. Diminuer les émissions de gaz à effet de serre de manière importante paraissait encore largement possible dans les années 1960, ou même au moment du Sommet de la Terre de Rio en 1992. Mais le stockage atmosphérique de quantités de gaz à effet de serre en constante croissance, sur des durées qui sont souvent de l'ordre du siècle, voire du millénaire pour une partie d'entre elles, ainsi que le mélange très rapide de ces gaz sous l'effet d'une circulation atmosphérique qui efface les frontières, tout cela contribue à créer une situation nouvelle. Cette anticipation du monde nouveau qui nous attend, se manifeste à des échelles temporelles très différentes les unes des autres. Celle de la planète, bien sûr, qui subit partout le réchauffement climatique lié aux gaz à effet de serre et réclame des politiques globales pour contribuer à son atténuation. Mais aussi celle des « territoires ». On désigne souvent sous ce nom les lieux proches des citoyens, leur lieu de travail. Anticiper les risques qui s'y présentent, développer les formes d'adaptation qui permettent d'y échapper : ce sont là toutes des actions

qui deviennent une obligation répondant au principe de précaution, un principe constitutionnel dans le droit français.

Des enjeux importants

Pour la France, particulièrement, qui émet chaque année 1 % des gaz à effet de serre qui sont mélangés sous l'effet de la circulation atmosphérique – alors que les émissions chinoises et américaines en représentent environ la moitié. Mais il est impossible pour elle de seulement miser sur des stratégies d'atténuation du changement climatique : ce ne sont pas des enjeux qu'elle peut dominer complètement, et ce quelle que soit sa part d'innovation et de créativité. Pouvoir aussi s'adapter, autant que possible, est donc nécessaire et cette nécessité croît sans cesse, comme l'a montré le récent rapport du groupe I du GIEC. Les émissions de gaz à effet de serre sont croissantes, leurs conséquences directes et indirectes le sont aussi, et elles ne seront que lentement réversibles. Nous sommes à ce stade très loin de satisfaire aux injonctions des Accords de Paris, et il est donc aujourd'hui impossible de garantir aux différents acteurs d'un territoire qu'ils ne seront pas fortement affectés par les changements à venir. Les émissions de gaz à effet de serre du passé déterminent en grande partie les changements climatiques du futur, et cette irréversibilité prend des chemins variés. Par exemple, les océans deviennent le réceptacle des excédents de chaleur. Dans ce cadre, ce que l'on appelle la neutralité carbone impose des conditions drastiques, très difficiles à tenir. En l'absence de puits de carbone suffisamment importants, cela signifie, si l'on souhaite rester sous la barre de 1,5°C, de renouveler en moins de trente ans 80 % des sources d'énergie à l'échelle mondiale – toutes celles qui sont carbonées, donc toutes celles qui touchent aux voitures traditionnelles, aux avions, aux bateaux... C'est une tâche colossale, pour laquelle il n'existe aujourd'hui aucun exemple qui puisse servir de référence. Mais une chose est certaine, nous sommes désormais confrontés à deux urgences qu'il faut apprendre à concilier : celle de l'atténuation – c'est-à-dire celle de la réduction des émissions de gaz à effet de serre – et celle de l'adaptation – c'est-à-dire celle de la gestion des territoires, des gens qui y vivent, de la faune et de la flore qui s'y développent. On oppose souvent ces deux notions, mais leur conciliation n'a rien d'impossible, bien au contraire. Il faut tirer parti de ce que sont déjà ces territoires, c'est-à-dire des lieux où les problèmes posés renvoient à plusieurs thématiques : urbanisme, infrastructures de transport, défense des zones naturelles et des zones vulnérables, développement de filières énergétiques ou agricoles, préservation de la qualité de l'air, de l'eau et des sols, de l'accès à la mer... Plus qu'une adaptation – le mot ayant une consonance un peu passive –, c'est un changement actif, un changement majeur en termes de prise de conscience mais aussi de développement scientifique et socio-économique, qui devient nécessaire.

Des critères nouveaux

Cette évolution attribue donc un rôle très important à la gestion des territoires au niveau régional : c'est très souvent à ce niveau que sont prises les décisions qui permettent de passer du stade de l'alerte à celui de l'action. Et c'est bien sûr aussi à ce niveau que l'on observe, très souvent, les points de blocage.

Le projet AcclimaTerra, créé à l'initiative de la région Nouvelle-Aquitaine et faisant suite à un travail mis en œuvre il y a douze ans dans le cadre de l'ancienne région Aquitaine, a pour objectif général d'analyser le climat et le changement climatique dans cette région. Il s'agit d'un vaste sujet, mais nous prendrons appui sur ce travail de manière légère, pour répondre à une interrogation un peu plus précise : en quoi les sciences, au sens très large de ce terme, peuvent nous permettre de mieux anticiper le futur ? La réponse principale tient sans doute en quelques mots : nous avons déjà dépassé certains seuils de réchauffement, et nous savons que les émissions d'hier déterminent les risques de demain, que les modèles climatiques savent relativement bien appréhender.

Mais il faut aller plus loin. Le travail réalisé en Nouvelle-Aquitaine offre en la matière de multiples illustrations. Comment gérer l'évolution sociale et économique de régions qui portent des situations de conflits internes ? Comment gérer celle des montagnes, dans un contexte d'évolution rapide ? Celle des villes ? Ou encore celle de cet immense littoral atlantique soumis à l'élévation du niveau de la mer, et à des mécanismes d'érosion tant atmosphériques que marins ? L'exemple le plus marquant du caractère systémique de ces enjeux, de la difficulté à les gérer, est certainement celui de l'eau, dont les usages multiples sont constamment sujets à débat (voir l'article de Denis Salles publié dans ce numéro de *Responsabilité & Environnement*).

Ces exemples peuvent nous ramener à des enjeux différents. Les calculs par ordinateur ne sont pas les seuls à éclairer le futur. Le premier Sommet de la Terre, celui de Stockholm en 1972, a surtout été marqué par la nécessité de nourrir et de faire vivre une population croissant rapidement. Le travail réalisé à cette époque par le Club de Rome reste à cet égard une référence toujours citée. S'il a suffi de quelques décennies pour que les gaz à effet de serre deviennent les acteurs majeurs des évolutions climatiques, il est impossible d'oublier l'importance de processus au rôle tout aussi essentiel, tels que le maintien de la biodiversité, la prise en compte des problèmes sociaux ou le respect des droits de l'homme. La complexité d'une situation qui fait intervenir des acteurs aussi nombreux, interagit avec le besoin de prendre des décisions toujours plus complexes, dans un contexte où tout n'est plus possible.

Dans ces conditions, le plus important des leviers de développement, à l'échelle mondiale comme aux échelles plus locales, sera certainement celui de l'éducation. Il doit permettre aux citoyens et aux étudiants de toutes origines de développer une forte autonomie de jugement, qui est nécessaire pour faire d'eux les acteurs d'un futur qui reste incertain. L'irruption de la crise sanitaire mondiale, s'ajoutant aux différentes

crises environnementales, sociales et politiques déjà existantes, a montré l'importance de ces formations et de l'urgence dont elles sont porteuses. L'éducation doit ainsi s'inscrire dans des temporalités différentes qui sont à la fois celles de la planète et celles des hommes qui l'habitent. L'évolution de la pauvreté à l'échelle mondiale constitue probablement l'exemple le plus significatif de ce besoin de suivi et d'actions à courte comme à longue échelle de temps, et les chiffres partagés par l'Unesco montrent clairement le lien entre pauvreté et éducation. D'un côté, des progrès considérables ont été effectués, puisqu'en l'espace de trente ans, ce sont plus d'un milliard de personnes qui ont réussi à sortir de l'extrême pauvreté, et ce malgré la croissance de la démographie. Mais de l'autre, ce mouvement s'est fortement ralenti depuis 2015 : ainsi, ce sont plus de 780 millions de personnes, soit près de 11 % de l'humanité, qui vivent en dessous du seuil international de pauvreté, établi à 1,90 dollars par jour.

En résumé, il est impossible de faire de la science un prescripteur de décisions. Celles-ci dépendent de valeurs diverses : celles des droits de l'humain, celles qui organisent les solidarités, mais aussi celles qui sont responsables des conflits et des guerres. Mais il n'en demeure pas moins que l'éclairage que permet la science dans une situation aussi rapidement évolutive, reste absolument nécessaire.

Bibliographie

REVELLE R. & SUES H. E. (1957), *Carbon Dioxide Exchange Between Atmosphere and Ocean and the Question of an Increase of Atmospheric CO₂ during the Past Decades*, February (first publication), <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3402/tellusa.v9i1.9075>

CHARNEY J. G., ARAKAWA A., BAKER D. J., BOLIN B., DICKINSON R. E., GOODY R. M., LEITH C. E., STOMMEL H. M. & WUNSCH C. I. (1979), *Carbon Dioxide And Climate: A Scientific Assessment*, July 27.

LE TREUT H. (dir) (2018), *Anticiper les changements climatiques en Nouvelle-Aquitaine. Pour agir dans les territoires*, AcclimaTerra, Éditions Région Nouvelle-Aquitaine, 488 pages.

MASSON-DELMOTTE V., ZHAI P., PIRANI A., CONNORS S. L., PÉAN C., BERGER S., CAUD N., CHEN Y., GOLDFARB L., GOMIS M. I., HUANG M., LEITZELL K., LONNOY E., MATTHEWS J. B. R., MAYCOCK T. K., WATERFIELD T., YELEKÇI O., YU R. & ZHOU B. (eds.) – IPCC (2021), "Climate Change 2021: The Physical Science Basis", Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press (In Press).

Les stratégies européenne et française d'adaptation au changement climatique

Par Jérôme DUVERNOY, Marie CARREGA et Sarah VOIRIN

Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique

Dans cet article, nous présentons un bref historique des politiques d'adaptation au changement climatique de l'Union européenne et de la France, qui sera suivi d'un panorama des politiques actuelles. Un aperçu des politiques climatiques en cours d'élaboration permet également de montrer le lien existant entre les politiques d'atténuation et les politiques d'adaptation.

Introduction

Une hausse des températures plus forte que la moyenne mondiale, une augmentation de l'intensité et de la fréquence des vagues de chaleur, des précipitations extrêmes et des sécheresses, une baisse de la ressource en eau et de l'enneigement, une hausse du niveau de la mer, une intensification des cyclones, tels sont les impacts du changement climatique que les émissions de gaz à effet de serre passées rendent désormais inéluctables et auxquels l'Europe et la France doivent se préparer. En effet, le réchauffement global et ses conséquences vont s'accroître tant que les émissions globales de CO₂ n'auront pas atteint le « zéro net », ce qui ne paraît pas possible avant 2050 environ. Même si la priorité a d'abord été donnée aux politiques d'atténuation (réduction des émissions de GES), l'Europe et la France ont entamé, l'une comme l'autre, des politiques d'adaptation au changement climatique, et ce depuis de nombreuses années ; leur ambition d'accroître leur résilience face aux impacts du changement climatique ne fait que s'amplifier.

La stratégie européenne d'adaptation

Dès 2009, la première pierre a été posée au niveau européen, avec la publication du Livre blanc intitulé « Adaptation au changement climatique : vers un cadre d'action européen », qui encourageait l'Union européenne (UE) et ses États membres à « promouvoir des stratégies destinées à renforcer la résilience face au changement climatique en ce qui concerne la santé, les infrastructures et les fonctions productives des sols, notamment en améliorant la gestion des ressources en eau et des écosystèmes. »

Ce Livre blanc a servi de socle à la Stratégie européenne relative à l'adaptation au changement climatique publiée en 2013.

Cette stratégie s'articulait autour de huit actions :

- encourager les États membres à se doter de stratégies d'adaptation globales ;
- accorder des subventions pour contribuer à développer les capacités et à renforcer l'action en faveur de l'adaptation en Europe ;
- encourager l'adaptation au niveau des villes, sur le modèle de la Convention des maires ;
- combler le déficit de connaissance ;
- développer le portail Climate-ADAPT en tant que « guichet unique » en Europe ;
- faciliter l'intégration des questions de résilience au climat dans la politique agricole commune (PAC), la politique de cohésion et la politique commune de la pêche (PCP) ;
- améliorer la résilience des infrastructures ;
- promouvoir des produits d'assurance et d'autres produits financiers pour des décisions d'investissement et des décisions commerciales « à l'épreuve du climat ».

La Commission a ensuite lancé en 2016 un processus d'évaluation de sa stratégie d'adaptation. Si le rapport sur sa mise en œuvre¹ (novembre 2018) a montré que la stratégie a globalement rempli ses objectifs, il a néanmoins conclu que l'Europe reste très vulnérable aux conséquences du changement climatique.

Très récemment, en février 2021, la nouvelle stratégie de l'Union européenne pour l'adaptation au change-

¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0738&from=FR>

ment climatique a été publiée avec l'ambition de « Bâtir une Europe résiliente », suivant quatre axes :

- une adaptation plus intelligente : améliorer les connaissances et gérer l'incertitude ;
- une adaptation plus systémique : soutenir l'élaboration de politiques à tous les niveaux et dans tous les secteurs ;
- une adaptation plus rapide : accélérer l'adaptation dans tous les domaines ;
- intensifier l'action internationale en faveur de la résilience face au changement climatique.

Pionnière au sein de l'UE, la politique de la France en matière d'adaptation a anticipé une trajectoire similaire et intimement mêlée à celle adoptée par l'UE dans ce même domaine.

La politique française d'adaptation au changement climatique

Faisant suite aux travaux du programme de recherche GICC (Gestion et impacts du changement climatique) débutés dès 1999, la Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique a été la réponse de la France pour orienter les actions d'adaptation au changement climatique. Cette stratégie a été élaborée dans le cadre d'une large consultation impliquant les différents secteurs d'activité économique et la société civile, laquelle a été menée par l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC), sous la responsabilité du délégué interministériel au développement durable. Elle a été validée le 13 novembre 2006 (publiée en 2007)² par le Comité interministériel du développement durable, présidé par le Premier ministre.

Un rapport sur les coûts de l'inaction (ONERC, 2009), qui a demandé deux ans de travaux, a ensuite permis de jeter les bases du premier plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) couvrant la période 2011-2015 (ONERC, 2012). Ce premier plan a permis d'améliorer la préparation de la France au changement climatique et a produit certains résultats remarquables, notamment en matière de connaissances avec la publication des volumes du *Climat de la France au XXI^e siècle*, expertise dirigée par le climatologue Jean Jouzel et donnant pour la première fois un aperçu global des principaux impacts du changement climatique observés et attendus en France³.

Puis l'axe 19 du plan Climat français, « S'adapter au changement climatique », publié le 6 juillet 2017, est venu renforcer ce socle d'actions : « Le changement climatique s'accélère et ses impacts en France seront importants dans les années à venir. Le gouvernement s'est engagé à protéger les Français et l'économie, en

particulier les secteurs et les régions les plus exposés, tels que l'agriculture, les forêts, les régions côtières et les zones montagneuses. »

Suite à l'évaluation du premier plan d'adaptation (ONERC, 2016), une démarche de concertation a permis la préparation du deuxième plan national d'adaptation (PNACC-2), qui couvre la période 2018-2022 (ONERC, 2017). Le PNACC-2 a été élaboré selon un des grands principes qui régissent le plan Climat, à savoir la mobilisation d'une intelligence collective se composant d'une grande diversité de parties prenantes, ce qui a permis de coconstruire les actions inscrites dans ce nouveau plan d'adaptation.

Avec son deuxième plan d'adaptation, la France vise une adaptation qui doit être effective dès le milieu du XXI^e siècle et correspondre à un climat régional en France métropolitaine et dans les territoires d'Outre-mer cohérent avec une hausse de la température globale de 2°C par rapport à la température préindustrielle. Son objectif est de mieux préparer la société française au changement climatique en intégrant l'adaptation de celle-ci dans les politiques publiques, en impliquant les territoires et les principaux secteurs de l'économie (agriculture, industrie, tourisme, etc.)⁴. Par rapport au premier PNACC (2011-2015), le PNACC-2 se distingue par les grandes orientations suivantes :

- une plus grande implication des acteurs territoriaux au sein d'une démarche nationale d'adaptation au changement climatique à la fois cohérente, coordonnée, partagée et suivie étroitement ;
- la priorité donnée aux solutions fondées sur la nature, partout où cela est pertinent ;
- une attention forte portée à l'Outre-mer qui se traduit par des mesures spécifiques à ces territoires très vulnérables au changement climatique ;
- l'implication des grandes filières économiques, laquelle commence par des études prospectives ;
- un suivi étroit de la mise en œuvre des mesures par une commission spécialisée du Conseil national de la transition écologique (CNTE). Représentative des parties prenantes et de la société, cette commission spécialisée est dirigée par Ronan Dantec, sénateur de Loire-Atlantique. Préparé par l'ONERC, le bilan annuel d'avancement du plan est présenté à la Commission spécialisée, laquelle prépare chaque année un avis soumis au vote du CNTE réuni en assemblée plénière.

Les cinquante-huit mesures inscrites dans le PNACC-2 se répartissent en six grands domaines d'action qui prennent en compte l'ensemble des enjeux liés aux impacts en cours et attendus du changement climatique :

- gouvernance : territorialisation du PNACC-2 et évolution des normes et des réglementations pour tenir compte du climat futur ;

² https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_Rapport_2006_Strategie_Nationale_WEB.pdf

³ https://www.ecologie.gouv.fr/observatoire-national-sur-effets-du-rechauffement-climatique-onerc#scroll-nav__6

⁴ <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2017.07.06%20-%20Plan%20Climat.pdf>

- prévention et résilience : amélioration de la prévention et renforcement de la résilience face à la recrudescence attendue des événements extrêmes ;
- nature et milieux : adaptation et préservation des milieux pour garantir l'évolution favorable de la biodiversité et de notre patrimoine environnemental ;
- filières économiques : adaptation des grandes filières économiques impactées par le changement climatique, dont le tourisme, l'agriculture, la pêche et l'aquaculture, la forêt et sa filière bois, ainsi que le secteur de la finance et de l'assurance ;
- connaissance et information : amélioration des connaissances et des moyens de formation et d'information des acteurs et du grand public pour accélérer l'adaptation de la France et consolider les bases sur lesquelles se prennent les décisions ;
- dimension internationale : développement et export du savoir-faire français en la matière et accroissement de l'influence de la diplomatie française dans les négociations climatiques.

Les travaux de la future Stratégie française Énergie et Climat (SFEC) ont été lancés le 11 octobre 2021. La SFEC est la feuille de route de la France pour atteindre la neutralité carbone en 2050 et pour assurer l'adaptation effective de notre pays au climat futur.

Elle sera constituée de la loi de programmation Énergie Climat (LPEC), de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC-3), du PNACC-3 et de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE 2024-2033). La LPEC a été créée par la loi relative à l'énergie et au climat de novembre 2019 (I de l'article L. 100-1 A). Elle doit être adoptée avant le 1^{er} juillet 2023. La SNBC-3 et la PPE

2024-2033 devront être compatibles avec la LPEC et être formalisées par décrets dans l'année suivant l'adoption de la LPEC. Pour renforcer l'articulation entre les politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, le PNACC-3 a été intégré à ce processus. Le troisième plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC-3) succédera ainsi au PNACC-2 et couvrira la période 2024-2029.

Des groupes de travail chargés de préparer le volet Adaptation au changement climatique de la LPEC seront mis en place en 2022. Un des thèmes examinés sera le renforcement de l'articulation entre les politiques nationales et les politiques territoriales d'adaptation au changement climatique.

Bibliographie

ONERC (2007), « Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique », La Documentation française.

ONERC (2009), « Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation », rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française.

ONERC (2012), « L'adaptation de la France au changement climatique », rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française.

ONERC (2016), « Adaptation au changement climatique, évaluation de la démarche nationale et recommandations », rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française.

ONERC (2017), « Vers un 2^e plan d'adaptation au changement climatique pour la France. Enjeux et recommandations », rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française.

Les liens entre adaptation et atténuation : quand s'adapter aggrave le changement climatique

Par Vincent VIGUIÉ

Chercheur au CIRED (École des Ponts ParisTech)

Si, au premier abord, l'« adaptation » au changement climatique et l'« atténuation » du changement climatique sont deux sujets relativement distincts, ils ne sont pas en pratique indépendants. Ils mobilisent en effet souvent les mêmes outils de politique publique, et se contraignent l'un l'autre. Notamment, certains choix d'adaptation peuvent mener à des consommations massives d'énergie (généralisation de la climatisation, dessalement de l'eau de mer...). Cela fait courir le risque d'un cercle vicieux dans lequel le changement climatique contribue lui-même à la hausse des émissions. Privilégier le déploiement d'autres stratégies, même si ce n'est pas toujours simple, est dès lors essentiel. Au-delà de l'atténuation, des questions similaires se posent avec d'autres enjeux sociaux ou environnementaux, et éviter le risque de conséquences involontairement néfastes associées à certains choix d'adaptation est un des enjeux cruciaux des années à venir.

Adaptation et atténuation

Si l'« adaptation » au changement climatique (l'ajustement aux effets du changement climatique) et l'« atténuation » du changement climatique (la réduction des émissions de gaz à effet de serre) visent au même objectif ultime, celui de réduire la gravité des impacts du changement climatique, elles soulèvent des questions très différentes. Il y a, par exemple, d'un côté, les questions de production énergétique, de gestion des systèmes de transport ou encore de tarification du carbone et, de l'autre, des questions de prévention des catastrophes naturelles, d'approvisionnement en eau potable, de gestion des crises sanitaires (les canicules, par exemple)...

Adaptation et atténuation ont ainsi pendant longtemps été étudiées par des communautés scientifiques relativement distinctes : elles sont, par exemple, examinées par deux groupes de travail différents au sein du GIEC. De même, elles sont généralement traitées de manière séparée par les politiques publiques. En France, notamment, si adaptation et atténuation doivent être traitées simultanément dans les PCAET (les plans Climat Air Énergie territoriaux, qui sont obligatoires pour toute collectivité de plus de 20 000 habitants), ces deux thèmes sont, dans la quasi-totalité des cas, examinés, en pratique, de manière indépendante au sein de ces plans. On retrouve une situation similaire dans la grande majorité des villes européennes s'étant doté d'une stratégie climat (Grafakos *et al.*, 2020).

Si cette séparation peut paraître relativement logique au premier abord, elle ne se justifie pas : en effet, les deux sujets sont en fait liés de manière profonde, et de plus en plus de travaux de recherche montrent la nécessité de les traiter conjointement. Plusieurs raisons justifient une telle approche. Tout d'abord, et de manière très générale, il est possible de s'adapter à une multitude d'impacts du changement climatique grâce à une « consommation accrue d'énergie ». Les exemples sont nombreux. L'un des plus parlants est celui de la climatisation : c'est une solution technique pratique et efficace pour faire face à l'augmentation de la fréquence des canicules, mais qui entraîne des consommations massives d'électricité. Si les climatiseurs n'étaient jusqu'à récemment que relativement peu présents en France (et en Europe, de manière générale), leur nombre a augmenté rapidement du fait de l'accroissement du risque caniculaire¹. En France, par exemple, on estime que 13 % des logements en étaient équipés en 2016, contre 5 % en 2005². Des évolutions similaires se produisent ailleurs dans le monde. À Vancouver (ville canadienne au climat proche du

¹ <https://www.washingtonpost.com/world/2019/06/28/europes-record-heatwave-is-changing-stubborn-minds-about-value-air-conditioning/>

² <https://ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9matique%20-%20Modes%20de%20vie%20et%20pratiques%20environnementales%20des%20Fran%C3%A7ais.pdf>

climat de Brest du fait de sa situation géographique), ce pourcentage est passé de 10 % en 2001 à 34 % en 2017³. Et, en Chine, près des deux-tiers des logements sont aujourd'hui équipés de climatiseurs⁴.

On peut également trouver des exemples similaires dans d'autres domaines. Lorsque des régions, dans lesquelles une baisse de l'accès à l'eau douce est attendue, sont situées près de la mer (ce qui, par exemple, est le cas de nombreuses zones au climat méditerranéen), le dessalement de l'eau de mer, si coûteux en énergie, constitue lui aussi une stratégie d'adaptation efficace. Cette technologie se développe d'ailleurs rapidement à travers le globe, permettant d'approvisionner aujourd'hui environ 300 millions de personnes (Robbins, 2019). Un exemple emblématique d'une telle stratégie est la ville du Cap, en Afrique du Sud, qui a récemment décidé de se baser sur ce type de technologie pour son approvisionnement en eau⁵, une décision prise à la suite d'une sécheresse historique qui a duré trois ans et qui est aujourd'hui 5 à 6 fois plus probable sous l'effet du réchauffement climatique ; une période durant laquelle la ville n'a évité la pénurie d'eau généralisée qu'au prix de mesures de restriction extrêmes (Pascale *et al.*, 2020 ; Tucker, 2020).

On peut citer de nombreux autres exemples, certes plus anecdotiques car touchant des zones plus réduites, mais qui peuvent avoir localement des impacts importants (Viguié *et al.*, 2021). C'est par exemple l'énergie nécessaire au fonctionnement des pompes qui font parties intégrantes des dispositifs de lutte contre les inondations ou encore certaines stratégies de lutte contre la baisse de l'enneigement en moyenne montagne. En 2020, en France, la station de ski pyrénéenne de Luchon-Superbagnères avait ainsi eu recours à la livraison par hélicoptère de 50 tonnes de neige pour tenter de pallier un manque de neige en bas des pistes. Cela avait d'ailleurs engendré un scandale entraînant une prise de parole de la ministre de l'Environnement de l'époque, du fait des émissions de gaz à effet de serre engendrées par une telle stratégie⁶. De manière moins extrême, les livraisons de neige par camion et l'utilisation de canons à neige se développent dans les stations de moyenne altitude, avec des coûts désastreux en termes de consommation d'énergie et d'impact environnemental (voir, par exemple, le rapport de la Cour des comptes remis à ce sujet, en 2018).

L'explication de fond tient au fait que l'énergie est quelque chose d'extrêmement utile pouvant servir à faire beaucoup de choses : elle peut notamment permettre de s'adapter à certains impacts du changement climatique. Tout cela fait courir le risque d'entrer dans un cercle vicieux, où le changement climatique pourrait

amener lui-même à une hausse des consommations d'énergie conduisant, à son tour, à un processus d'auto-entraînement, à une hausse des émissions de gaz à effet de serre. Ce type de mécanisme n'est pas nouveau : de nombreux exemples historiques existent, où des sociétés, dans le passé, pour faire face à des changements environnementaux néfastes, se sont lancées dans des actions qui ont enfermé le problème environnemental dans un cercle vicieux délétère (Rappaport, 1977 ; Diamond, 2004 ; Magnan *et al.*, 2016).

Un choix de politique publique

Réussir à emprunter d'autres chemins est un enjeu crucial. L'anticipation, à travers la mise en place de réglementations idoines et, surtout, de mesures alternatives d'adaptation, peut permettre d'éviter ou, du moins, de limiter l'essor de ces actions consommatrices d'énergie. De nombreuses stratégies existent en effet pour pouvoir s'adapter aux impacts du réchauffement climatique, et il est possible de choisir de privilégier celles qui ne consomment pas (ou peu) d'énergie, même si cela n'est pas toujours simple. Si l'on reprend l'exemple des canicules, les toitures réfléchissantes (ou peintes d'une couleur claire), l'installation sur les fenêtres de volets extérieurs, assurer une bonne circulation de l'air..., sont autant de moyens pour freiner la hausse des températures dans les logements lorsqu'il fait chaud dehors⁷. Le déploiement de telles solutions n'est pas aisé, surtout dans les bâtiments anciens, mais s'avère nécessaire pour limiter le recours à la climatisation (Viguié *et al.*, 2020).

Un autre type d'actions complémentaires consiste à agir non pas sur les bâtiments, mais sur le plan de l'urbanisme, notamment l'aménagement urbain. La végétalisation des espaces publics est l'exemple le plus connu et figure dans de nombreux plans Climat de collectivités françaises. La végétation, par son effet d'évapotranspiration, permet en effet de rafraîchir l'air en été. Cependant, cette solution illustre une autre facette des interactions entre atténuation et adaptation : faire de la place en ville pour créer des parcs et des espaces verts limite en effet la construction de logements en centre-ville, et donc la densification de celui-ci. Or, rendre les villes plus denses et limiter ainsi l'étalement urbain est l'un des leviers permettant de réduire les émissions des transports, grâce à une utilisation plus efficace des transports en commun et des modes de transport doux (marche, vélo, etc.). Cela permet également de limiter l'artificialisation des sols et ses impacts sur les écosystèmes.

Cette situation conflictuelle, mise en évidence depuis de nombreuses années par le monde académique (McEvoy *et al.*, 2006 ; Hamin et Gurran, 2009 ; Viguié et Hallegatte, 2012), se manifeste ces dernières années de manière vive à travers la révision des plans locaux

³ <https://vancouver.sun.com/news/local-news/number-of-b-c-households-relying-on-air-conditioners-growing-b-c-hydro-report>

⁴ <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling-in-china>

⁵ <https://www.capetownetc.com/news/the-city-wants-to-build-a-r1-8-billion-desalination-plant/>

⁶ https://www.lemonde.fr/planete/article/2020/02/16/enneiger-des-stations-de-ski-par-helicoptere-n-est-pas-une-voie-possible-assure-elisabeth-borne_6029768_3244.html

⁷ <https://www.cstb.fr/fr/actualites/detail/lutter-contre-effets-canicule-et-preserver-confort-usagers-2020-09/>

d'urbanisme de plusieurs villes françaises, notamment celui de Paris⁸. Lorsque l'on regarde les choses plus en détail, le choix n'est en fait pas binaire : il est en effet possible de concilier ville dense et présence de parcs. Cela nécessite cependant des études précises du pouvoir rafraîchissant que présentent les différents types de parcs (lequel dépend des essences utilisées, des scénarios de changement climatique retenus, etc.) et de disposer d'un accès aux transports décarbonés. Concilier adaptation et atténuation est certes complexe et technique, mais pas impossible.

La mal-adaptation

Analyser les impacts indirects sur les émissions de gaz à effet de serre des stratégies d'adaptation, que sont notamment les politiques de verdissement des villes, n'est pas une chose aisée. Cela l'est encore moins quand on doit faire entrer dans l'équation les autres enjeux environnementaux auxquels l'adaptation ne doit pas nuire par ailleurs, comme la préservation des écosystèmes. L'utilisation de canons à neige pour faire face à la diminution de l'enneigement, comme mentionné plus haut, nécessite une grande quantité d'eau et peut ainsi mettre en péril la ressource en eau au plan local. Il en va de même d'ailleurs pour l'utilisation de la végétation pour maintenir des températures fraîches en ville en périodes de canicule (une végétation qui souffre d'un déficit d'eau (n'étant plus arrosée) perd quasiment tout son pouvoir rafraîchissant). Dans d'autres domaines, la construction de digues pour contrer la montée du niveau de la mer peut nuire aux écosystèmes côtiers, tout comme l'utilisation de produits phytosanitaires pour faire face aux nouvelles espèces invasives peut nuire aux sols et à certains écosystèmes continentaux. Les exemples sont là aussi multiples.

Tout cela entre dans le domaine de ce que l'on nomme la « mal-adaptation ». Ce concept désigne les actions d'adaptation qui ont été prises en croyant qu'elles allaient résoudre un problème, et qui conduisent, au contraire, à un accroissement des risques et des impacts. Cet accroissement peut concerner tout ou partie de la population, et se produire sur le court ou le long terme. La climatisation, pour reprendre cet exemple, peut relever de la mal-adaptation, et ce à plusieurs titres : parce qu'elle peut conduire à une augmentation des émissions de gaz à effet de serre, comme nous l'avons dit précédemment, et parce qu'elle peut également, dans certains cas, être vue comme un amplificateur des vulnérabilités face aux canicules extrêmes. En effet, une stratégie d'adaptation reposant en grande partie sur cette technologie fait courir le risque d'impacts sanitaires importants en cas de difficultés d'approvisionnement en électricité. C'est ce qui est aujourd'hui régulièrement observé aux États-Unis, où les coupures d'électricité sont en augmentation constante tous les étés (Stone

et al., 2021) et où, pendant les canicules, se multiplient des campagnes de communication de crise incitant à économiser l'électricité de manière à ce que les climatiseurs puissent continuer à fonctionner⁹. La climatisation peut également relever de la mal-adaptation, dans le sens où elle peut aggraver la canicule subie par certains habitants. Les rejets de chaleur des climatiseurs, en ville, peuvent en effet contribuer de manière non négligeable à réchauffer les températures dans les rues : l'usage généralisé de la climatisation aggrave les canicules pour ceux qui ne peuvent pas ou ne veulent pas s'équiper de systèmes d'air conditionné. En protégeant certains, elle aggrave le risque pour d'autres.

En pratique, le risque de mal-adaptation est loin d'être négligeable. Dans une étude publiée en 2021, Siri Eriksen et ses co-auteurs (Eriksen *et al.*, 2021) ont ainsi analysé une trentaine des projets d'adaptation financés par des bailleurs internationaux (la Banque mondiale, par exemple) et montré comment chacun d'entre eux peut, d'une manière ou d'une autre, être considéré comme une telle mal-adaptation. Plus particulièrement, deux schémas, qui sont observés de manière récurrente, correspondent, d'une part, aux projets qui, au lieu de réduire la vulnérabilité, ne font que la redistribuer (c'est-à-dire aggravent la vulnérabilité d'autres personnes) et, d'autre part, ceux qui introduisent de nouvelles sources de vulnérabilité, comme dans l'exemple de la climatisation et du risque de coupure de courant induit que j'ai mentionné plus haut.

Comment résoudre ce problème ? Et peut-on construire des stratégies d'adaptation sans qu'elles s'accompagnent d'effets pervers involontaires ? De nombreux outils opérationnels ont été développés pour identifier les risques de mal-adaptation et guider la mise en œuvre de stratégies d'adaptation efficaces (voir, par exemple, Magnan *et al.*, 2016). L'une des clés est de ne pas considérer l'adaptation comme un sujet en soi, mais de construire des stratégies territoriales de développement prenant en compte explicitement les différents contraintes environnementales et sociales, que ce soit les différents impacts du changement climatique, l'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre, le maintien de la biodiversité, mais également l'accès aux biens et services essentiels pour les habitants, tels que le logement, l'eau, les services publics, etc. (voir, par exemple, les approches développées par Raworth (2012, 2017)). Le sujet reste cependant complexe : l'identification des risques de mal-adaptation, la compréhension des mécanismes socio-économiques, administratifs ou politiques menant à de tels écueils, la création d'indicateurs pertinents pouvant guider l'action publique... sont des questions qui sont encore loin d'être résolues, et sur lesquelles la recherche est en ce moment très active.

⁸ <https://www.leparisien.fr/paris-75/urbanisme-a-paris-construire-des-logements-tout-en-protectant-des-espaces-verts-difficile-equation-pour-la-ville-09-11-2021-7LYFBZ4IBREPVA3ZKN34O-QSWYY.php>

⁹ <https://www.nytimes.com/2021/05/03/climate/heat-climate-health-risks.html>

Références bibliographiques

COUR DES COMPTES (2018), « Les stations de ski des Alpes du Nord face au réchauffement climatique : une vulnérabilité croissante, le besoin d'un nouveau modèle de développement », Rapport public annuel 2018.

DIAMOND J. (2004), *Collapse*, Abridged. ed. Penguin Audio, New York.

ERIKSEN S., SCHIPPER E. L. F., SCOVILLE-SIMONDS M., VINCENT K., ADAM H. N., BROOKS N., HARDING B., LENAERTS L., LIVERMAN D. & MILLS-NOVOA M. (2021), "Adaptation interventions and their effect on vulnerability in developing countries: Help, hindrance or irrelevance?", *World Development* 141, 105383.

GRAFAKOS S., VIERO G., RECKIEN D., TRIGG K., VIGUIÉ V., SUDMANT A., GRAVES C., FOLEY A., HEIDRICH O., MIRAILLES J. M., CARTER J., CHANG L. H., NADOR C., LISERI M., CHELLERI L., ORRU H., ORRU K., AELENEI R., BILSKA A., PFEIFFER B., LEPETIT Q., CHURCH J. M., LANDAUER M., GOULDSON A. & DAWSON R. (2020), "Integration of mitigation and adaptation in urban climate change action plans in Europe: A systematic assessment", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 121, 109623, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109623>

HAMIN E. M. & GURRAN N. (2009), "Urban form and climate change: Balancing adaptation and mitigation in the U.S. and Australia", *Habitat International* 33, pp. 238-245, <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2008.10.005>

MAGNAN A. K., SCHIPPER E. L. F., BURKETT M., BHARWANI S., BURTON I., ERIKSEN S., GEMENNE F., SCHAAR J. & ZIERVOGEL G. (2016), "Addressing the risk of maladaptation to climate change", *WIREs Clim. Change* 7, pp. 646-665, <https://doi.org/10.1002/wcc.409>

McEVOY D., LINDLEY S. & HANDLEY J. (2006), "Adaptation and mitigation in urban areas: synergies and conflicts", in: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer*, pp. 185-192.

PASCALE S., KAPNICK S. B., DELWORTH T. L. & COOKE W. F. (2020), "Increasing risk of another Cape Town 'Day Zero' drought in the 21st century", *PNAS* 117, pp. 29495-29503, <https://doi.org/10.1073/pnas.2009144117>

RAPPAPORT R. A. (1977), *Maladaptation in social systems*, Boletín CF+ S.

RAWORTH K. (2017), *Doughnut Economics: Seven Ways to Think Like a 21st Century Economist*, ed. Cornerstone Digital, 1^{ère} édition.

RAWORTH K. (2012), *A safe and just space for humanity: can we live within the doughnut?*, Oxfam Discussion Papers.

ROBBINS J. (2019), "As Water Scarcity Increases, Desalination Plants Are on the Rise", *Yale Environment* 360, <https://e360.yale.edu/features/as-water-scarcity-increases-desalination-plants-are-on-the-rise>

STONE B., MALLIN E., RAJPUT M., GRONLUND C. J., BROADBENT A. M., KRAYENHOFF E. S., AUGENBROE G., O'NEILL M. S. & GEORGESCU M. (2021), "Compound Climate and Infrastructure Events: How Electrical Grid Failure Alters Heat Wave Risk", *Environ. Sci. Technol.* 55, pp. 6957-6964, <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00024>

TUCKER D. T. (2020), "Cape Town's 'Day Zero' drought a sign of things to come", *Stanford News*, <https://news.stanford.edu/2020/11/09/cape-towns-day-zero-drought-sign-things-come/>

VIGUIÉ V. & HALLEGATTE S. (2012), "Trade-offs and synergies in urban climate policies", *Nature Climate Change* 2, pp. 334-337, <https://doi.org/10.1038/nclimate1434>

VIGUIÉ V., JUHEL S., BEN-ARI T., COLOMBERT M., FORD J. D., GIRAUDET L. G. & RECKIEN D. (2021), "When adaptation increases energy demand: A systematic map of the literature", *Environ. Res. Lett.* 16, 033004, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abc044>

VIGUIÉ V., LEMONSUA., HALLEGATTE S., BEAULANTA.-L., MARCHADIER C., MASSON V., PIGEON G. & SALAGNAC J.-L. (2020), "Early adaptation to heat waves and future reduction of air-conditioning energy use in Paris", *Environ. Res. Lett.* 15, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6a24>

L'adaptation au changement climatique : d'abord de l'intelligence mise dans les projets

Par Morgane NICOL et Vivian DÉPOUES

Institut de l'économie pour le climat (I4CE – Institute for climate economics)

Alors que les bénéfices de l'anticipation sont largement démontrés, le niveau d'adaptation aux changements climatiques en France reste faible. Ce constat invite à analyser les barrières rencontrées par les acteurs qui cherchent à se saisir du sujet. Dans cet article, nous revenons sur deux des cas d'étude conduits dans le cadre du projet de recherche Finadapter, tous deux situés en contexte urbain : la mise en œuvre du plan d'adaptation de la métropole européenne de Lille et l'aménagement d'une ZAC en zone inondable dans la métropole nantaise. Ces deux cas montrent la nature des réponses à déployer, qui loin d'être uniquement des solutions techniques prêtes à l'emploi prennent également et le plus souvent la forme de combinaisons de mesures toujours spécifiques à un contexte. L'analyse de ces situations tend à démontrer qu'adapter un territoire au changement climatique n'engendre pas systématiquement des surcoûts importants, mais demande d'y consacrer des ressources humaines, du temps et une expertise pour interroger la manière dont sont conduits certains projets et certaines politiques.

Dépasser l'analyse coûts-bénéfices pour comprendre les conditions d'une dynamique d'adaptation

La littérature relative à l'adaptation au changement climatique s'accorde sur le fait que le rapport coûts-bénéfices à une échelle macro-économique est largement en faveur de l'adaptation, c'est-à-dire que le coût des actions à mener pour anticiper et se préparer aux conséquences du changement climatique est largement inférieur au coût des dommages auxquels nous ne nous préparerions pas (Global Commission on Adaptation, 2019 ; COACC, 2018). Pourtant, même si les impacts du changement climatique sont déjà observés, l'investissement de ressources humaines et financières dans l'anticipation des évolutions est encore trop rarement fait (Haut Conseil pour le climat, 2021b). Les habitudes et pratiques héritées d'un climat considéré comme stable et maîtrisé ne sont que très rarement interrogées, y compris à l'échelle, pourtant critique, de l'aménagement et du développement économique des territoires. Il existe donc d'autres freins et obstacles à l'adaptation qu'il convient de comprendre pour pouvoir y apporter des solutions et permettre une dynamique de généralisation de l'adaptation. Ces barrières sont souvent décrites comme organisationnelles et relevant de la gouvernance avant d'être économiques et financières (IDDRI, 2019 ; Huitema *et al.*, 2016).

Une analyse de cinq études de cas

Afin de mieux comprendre quelles sont les conditions permettant la mise en œuvre d'actions d'adaptation, cinq cas ont été analysés dans le cadre du projet Finadapter¹. Nous nous sommes demandé, en partant de l'analyse de situations réelles et en interrogeant de nombreux acteurs de terrain, pourquoi il était si difficile d'intégrer systématiquement l'adaptation dans des projets et des politiques territoriales. Ces cas donnent à voir différents types de démarches qui souhaitent explicitement et activement à tenir compte du contexte du changement climatique et de l'impératif d'adaptation. Ils rendent compte des défis auxquels se confrontent ceux qui cherchent à prendre au sérieux cette question.

Dans cet article, nous nous concentrons sur deux de ces cas, qui se situent tous deux en contexte urbain : la mise en œuvre du plan d'adaptation de la métropole européenne de Lille et l'aménagement d'une ZAC en zone inondable dans la métropole nantaise. Ces cas illustrent deux processus complémentaires visant à prendre en compte les enjeux d'adaptation en contexte urbain : le premier consiste en une démarche de planification cohérente et systémique sur l'ensemble du territoire concerné ; le second vise à l'intégration de la dimension Adaptation dans un projet spécifique – ici, d'aménagement.

¹ Pour plus de détails sur le projet Finadapter conduit sur 2019-2021 par I4CE et Ramboll France avec le soutien de l'Ademe, voir : https://www.i4ce.org/go_project/finadapter/

La mise en œuvre de l'axe Adaptation du plan Climat de la métropole européenne de Lille

L'enjeu de l'adaptation aux changements climatiques est bien identifié dans la politique de la métropole européenne de Lille

La première étape pour l'adaptation à l'échelle d'une collectivité peut passer par l'identification et la priorisation des enjeux qui la concerne (ADEME, 2019). Cette compréhension des enjeux partagée avec les acteurs du territoire permet alors de se doter d'une vision stratégique de l'adaptation, qui doit ensuite être portée politiquement.

À la métropole européenne de Lille (MEL), l'adaptation aux changements climatiques représente bien un des axes directeurs du nouveau plan Climat Air Énergie territorial (PCAET). Le travail d'élaboration du PCAET, basé sur un large processus de concertation, a initié une dynamique de mobilisation d'un écosystème d'acteurs. Un Haut Conseil métropolitain pour le climat a été mis en place pour garantir la participation d'une diversité d'acteurs dans la mise en œuvre du PCAET. La stratégie d'adaptation de la MEL dessine ainsi un cadre cohérent, dans lequel les enjeux prioritaires d'adaptation et les acteurs à mobiliser sont bien identifiés.

Par ailleurs, la mise en œuvre du plan Climat de la MEL semble, au moment où a été conduit ce cas d'étude, être animée techniquement et portée politiquement. Ce sujet a notamment bénéficié d'une large visibilité dans les discours de début de mandat. Lors d'une série d'entretiens, nous avons pu identifier plusieurs facteurs contribuant à l'attention portée sur ce sujet : le portage de celui-ci par quelques élus tout au long de quatre mandats ; des projets emblématiques associant les habitants, comme la politique « Verdissons nos murs » de la ville de Lille ; ou encore l'actualité internationale, nationale ou locale, notamment les canicules qu'a connues la métropole en 2018 et 2019, lesquelles ont conduit à des problèmes sur le plan de la qualité de l'eau potable.

Mettre en œuvre le plan Climat requiert d'intégrer la dimension Adaptation dans certaines politiques préexistantes

Le PCAET de la MEL a été adopté en février 2021. Les mesures d'adaptation les plus structurantes identifiées dans ce plan consistent à intégrer cette considération dans certaines politiques préexistantes relevant de la compétence de la métropole, lesquelles sont portées notamment par les directions de l'eau et de l'assainissement, de la voirie, de la nature en ville ou encore de l'urbanisme et de l'aménagement. Il ne s'agit pas systématiquement de faire quelque chose de nouveau, mais plutôt de conduire autrement des interventions ou des projets préexistants.

Il s'agit avant tout de mieux articuler les domaines de compétence et de permettre une association d'expertises et de regards sur un certain nombre d'actions qui

jusqu'ici étaient conduites selon une logique de silos. Par exemple, la question de l'écoulement des eaux de pluie n'est généralement jamais évoquée au tout début d'une opération d'aménagement. L'étude de cette question est plutôt réalisée une fois les contours de l'opération définis et les travaux engagés (par exemple, la construction d'un bassin enterré en béton) pour en limiter les conséquences *a posteriori*. Ces modes de faire, séquentiels, ne permettent pas une bonne prise en compte de l'adaptation, laquelle invite à penser en priorité à comment réduire l'imperméabilisation, limiter le ruissellement et favoriser l'infiltration.

Mettre en place une organisation qui permette d'inscrire cette réflexion dans la transversalité

S'il existe un certain nombre d'opérations exemplaires, celles-ci en côtoient d'autres qui ne vont pas au-delà des exigences réglementaires. Le défi est donc bien celui de la systématisation, du passage de l'exceptionnel au standard, de faire évoluer la manière de conduire les projets et les politiques. Les agents devront ainsi être tantôt des chefs de projet, tantôt des contributeurs actifs à des projets portés par d'autres directions. Il va également y avoir un besoin de disposer de nouveaux outils de gestion et de pilotage. Deux outils ont été cités pendant nos entretiens : l'élaboration d'une orientation d'aménagement et de programmation (OAP) Climat pour systématiser les pratiques vertueuses dans l'urbanisme et la réalisation d'une analyse Climat des budgets pour questionner la prise en compte de l'aspect Adaptation dans chaque projet et politique.

Dans les interviews que nous avons conduites, la contrainte financière n'a jamais été identifiée comme étant le premier et principal frein. Les enjeux d'organisation et de transversalité apparaissent largement dominants. Ils ne sont jamais évoqués en termes économiques, mais pourraient être traduits comme un manque de ressources internes. Les éléments présentés convergent, en effet, vers un accroissement des dépenses de fonctionnement consacrées à la préparation et à la conduite des politiques. La transversalité, l'interdisciplinarité comme la concertation sont autant d'habitudes qui nécessitent un apprentissage, et donc du temps. Une partie de ces coûts de fonctionnement pourraient être minorés grâce à l'installation de nouveaux réflexes. Mais il est plus raisonnable de penser que, pour mieux prendre en compte, intervention par intervention, les spécificités de chaque situation, une ingénierie et des ressources humaines qualifiées seront nécessaires dans la durée.

Nantes métropole : un projet d'aménagement ambitieux, Pirmil – Les Isles

L'enjeu : créer une ZAC dans une zone en partie inondable

Créée en 2018, la zone d'aménagement concertée (ZAC) de Pirmil – Les Isles, située dans la métropole

de Nantes, constitue une bonne expérimentation de ce qu'est un projet d'aménagement prenant pleinement en compte les enjeux d'adaptation. Cette ZAC de 58 ha, située à l'intérieur d'un territoire de 200 ha concerné par une démarche globale de renouvellement urbain, prévoit sur la période 2018-2037, la construction de 3 300 logements, auxquels s'ajouteront près de 100 000 m² de bureaux, de locaux d'activité, de commerces et d'équipements publics.

Un environnement institutionnel favorable à la réalisation d'un projet ambitieux en termes d'adaptation

La prise en compte de l'évolution du risque d'inondation a constitué, dès le départ, une condition essentielle pour que la zone considérée reste aménageable dans le cadre du nouveau PPRI. Plusieurs des acteurs interrogés soulignent la chance qu'a constitué la bonne articulation des calendriers : l'expression explicite de la volonté de Nantes métropole au moment où le PPRI devait être élaboré et prescrit, a permis de prendre en compte les spécificités du projet dans le règlement du PPRI, notamment d'inscrire dans celui-ci certaines prescriptions pour faire en sorte que cette construction en zone inondable soit acceptable et sûre. L'établissement de ce cadre a demandé du temps, ainsi que la réalisation de plusieurs études hydrologiques dédiées et la coordination de l'intervention de multiples acteurs (les services de l'État, la collectivité et l'aménageur, notamment). Tout cela a été possible parce que le projet n'en était qu'à un stade se situant relativement en amont et parce qu'il était porté par une collectivité et un maître d'ouvrage disposant d'une grande capacité d'ingénierie. La réunion de ces différentes conditions a rendu possible une évolution de l'attitude collective face au risque d'inondation.

Une démarche volontariste de l'aménageur lors des phases de conception

Dans les étapes suivantes du processus, les porteurs du projet ont prolongé leur réflexion sur les évolutions du climat en y intégrant les enjeux de l'habitabilité et de la qualité de vie dans un monde plus chaud. Cela a mené à une réflexion d'ensemble portant sur la perméabilité des sols, la conception des bâtiments ou encore sur la place de la végétation dans le projet. Le réseau d'espaces ombragés et de lieux de fraîcheur qui est envisagé, est ainsi décrit comme un « équipement indispensable » du projet final. Ces propositions ont nécessité la mobilisation de compétences nouvelles et complémentaires (par exemple, en matière d'ingénierie écologique) et de consacrer du temps à l'approfondissement des études, à l'expérimentation et à la concertation avec tous ceux qui seront concernés par les changements induits : les entreprises du bâtiment, les pépiniéristes, les services des espaces verts de la collectivité, etc.

Le passage des concepts à la formulation d'une commande qui génère des changements, tout en assurant un équilibre économique satisfaisant pour chacun des acteurs du projet

Le principal défi réside dans la traduction opérationnelle de ces ambitions. En effet, les esquisses préalables d'un projet urbain peuvent ne pas résister aux arbitrages qu'imposent les contraintes de temps, de budget et de faisabilité technique. Dans le cas du projet de Pirmil – Les Isles, cette étape critique du processus est toujours en cours. L'équipe de maîtrise d'ouvrage doit innover pour formuler ses exigences, en inscrire certaines dans des documents prescriptifs, parfois imposer des procédés constructifs, ou présenter ses ambitions sous forme d'obligations de résultats. Des

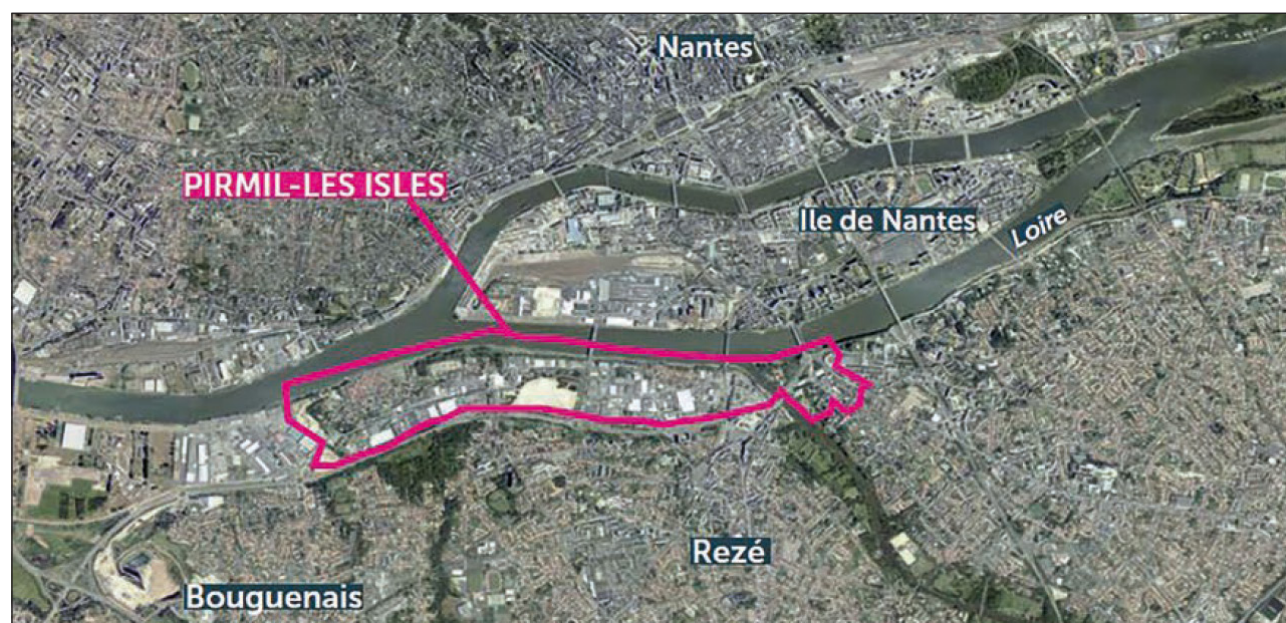


Figure 1 : Aire de réalisation du projet de la Zac de Pirmil – Les Isles – Sources : Nantes métropole aménagement et Novabuild.

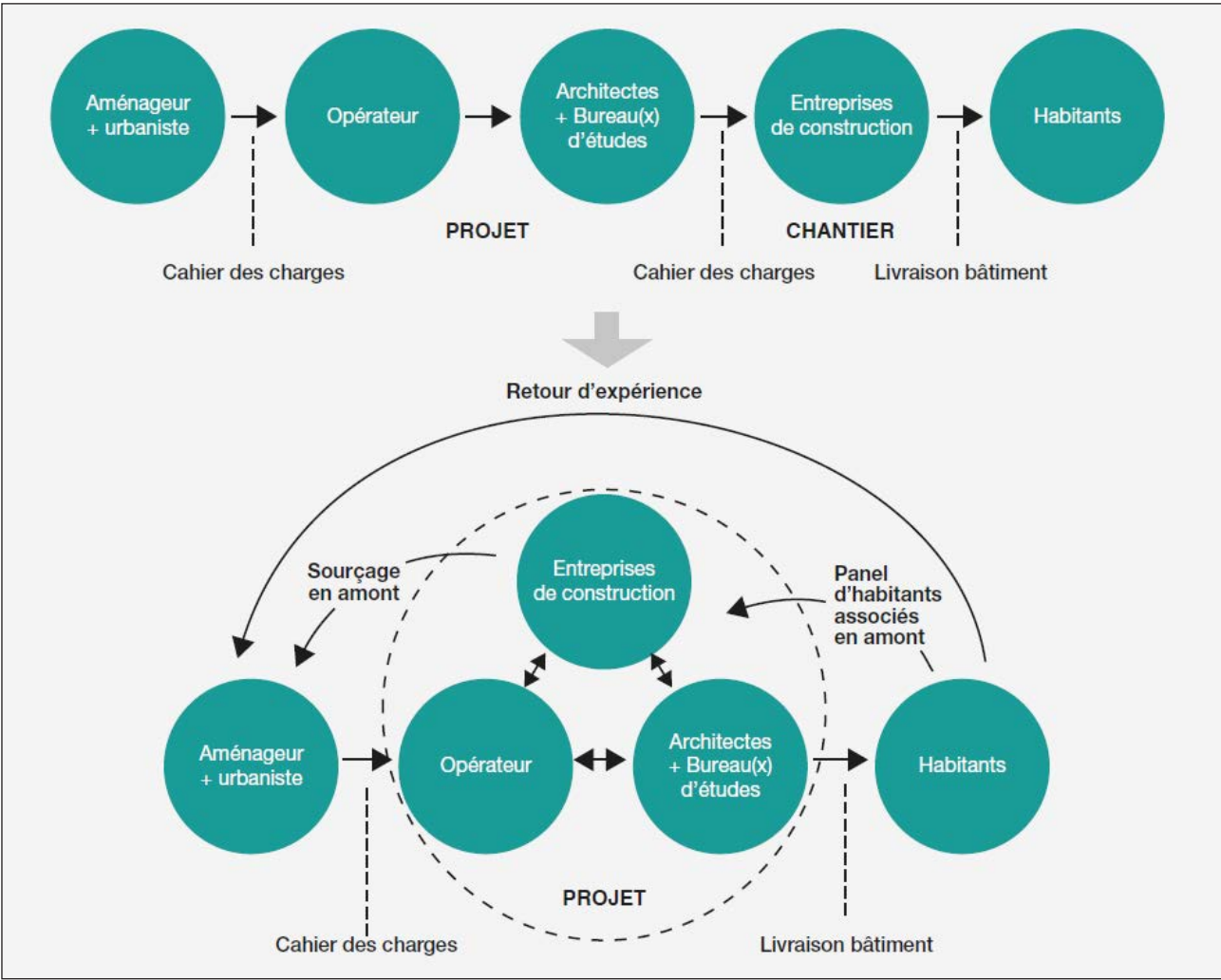


Figure 2 : Glissement d'un processus « classique », à la fois linéaire et cloisonné, d'association des acteurs vers un nouveau processus plus interactif – Source : présentation de l'équipe de maîtrise d'œuvre 2019-2020.

études *ad hoc* destinées à évaluer l'impact des différentes options envisagées sur la faisabilité technique et économique du projet ont été nécessaires. Les porteurs du projet doivent également s'assurer que les ambitions affichées ne découragent pas les futurs candidats à l'attribution de lots, compte tenu de l'environnement très concurrentiel dans lequel se réalise ce type d'opérations. Cela implique d'être en mesure de chiffrer en amont les différentes options et d'interagir avec des filières qui n'y sont pas forcément habituées, pour préciser les demandes au fur et à mesure de l'avancement du projet.

Ces défis à relever ont exigé de revoir avec elles les manières de travailler, et de glisser d'un processus linéaire et cloisonné vers un nouveau processus plus interactif et itératif, associant les entreprises et les citoyens, et ce dès la phase de conception du projet. Une ingénierie d'animation dédiée a été mise en place pour orchestrer ces évolutions.

Un projet d'aménagement qui, finalement, ne devrait pas être significativement plus coûteux

Malgré ces défis, quasiment toutes les parties prenantes interrogées considèrent que les ambitions originales de Pirmil – Les Isles, notamment en matière d'adaptation aux changements climatiques, ne rendront pas le projet significativement plus coûteux. Les surcoûts lors des étapes amont du projet, liés à des temps de préparation plus longs et à des besoins d'études plus importants, resteraient marginaux par rapport à l'ampleur des dépenses d'investissement nécessaires à sa réalisation.

Les choix d'urbanisme et de conception retenus pourraient en revanche avoir des effets sur le modèle économique des opérations immobilières : minimiser l'imperméabilisation des sols, accorder une place importante à la végétation, privilégier des logements bi-orientés et traversants, prévoir des hauteurs sous plafond suffisantes pour installer des brasseurs d'air ou encore repenser les usages des rez-de-chaussée pour prévoir la possibilité qu'ils laissent s'écouler l'eau sont autant de décisions qui peuvent avoir des conséquences sur l'économie globale du projet. Cependant, l'aménageur

considère possible d’atteindre l’objectif tout en tenant dans des enveloppes budgétaires comparables à celles d’un projet plus « classique ». Pour cela, plusieurs pistes sont envisagées : revoir les équilibres entre les différents postes de coûts, par exemple les surcoûts liés à une présence plus importante de la végétation seraient compensés par moins de travaux de génie civil portant sur les espaces publics ; faire des choix plus économes, par exemple en choisissant des plants plus jeunes ; optimiser les flux de matières sur le chantier ; réduire les frais de commercialisation et les dépenses qualifiées de « gadgets ».

Là encore, l’intégration des enjeux d’adaptation dans un tel projet d’aménagement interroge en tout premier lieu les pratiques et les habitudes de travail. Un tel processus de questionnement ne se déclenche pas tout seul ; en outre, il prend du temps. Le premier besoin pour engager une démarche réellement adaptée aux changements climatiques est donc de se donner les moyens de mettre de l’intelligence dans le projet.

En conclusion – Adapter son territoire au changement climatique demande d’abord d’y consacrer les ressources humaines nécessaires pour intégrer l’expertise et permettre la transversalité

Ces cas donnent à voir que là où la réflexion sur l’adaptation est la plus avancée, les réponses apportées prennent la forme de combinaisons de solutions cohérentes sur le plan non seulement technique mais égale-

ment organisationnel. Aucune action isolée n’est à elle seule à la hauteur de l’enjeu. Par ailleurs, les réponses à apporter restent, pour la plupart, spécifiques à chaque contexte. Il n’est pas souhaitable de concentrer les efforts et les moyens sur la mise en œuvre de quelques actions phares, qui, certes facilement valorisables, interviendraient néanmoins au détriment de cette cohérence d’ensemble. Soutenir l’adaptation, c’est donc surtout de ne pas aller trop vite vers la standardisation d’une offre de « solutions d’adaptation ».

Ces exemples donnent également à voir l’importance d’un portage politique fort d’un l’objectif visant à l’adaptation du territoire aux changements climatiques, et de la nécessité que cet objectif soit posé au bon moment, c’est-à-dire bien en amont de la conception des projets.

En résumé, les deux cas évoqués dans cet article rendent compte des défis que rencontrent ceux qui cherchent à aller au-delà des déclarations d’intention, à prendre au sérieux la question de l’adaptation et à y apporter des réponses à la hauteur des enjeux. Chacun des cas étudiés dans le cadre du projet Finadapter le démontre : prendre la mesure de l’adaptation aux changements climatiques n’entraîne pas automatiquement des surcoûts significatifs. Cela demande avant tout et nécessairement d’identifier suffisamment tôt les situations où les enjeux d’adaptation sont forts et de développer des manières de travailler, souvent plus transversales, participatives et itératives, qui permettent de bien les intégrer dans le processus décisionnel. Cela requiert donc avant tout d’y consacrer du temps et des ressources d’expertise. Le principal défi est ainsi d’accompagner le déploiement des logiques de gestion adaptative, ce qui génère des besoins spécifiques aux trois niveaux mentionnés dans la figure suivante :



Quelles perspectives pour l'eau et l'agriculture d'ici à 2050 dans le contexte du changement climatique ?¹

Par **Hugues AYPHASSORHO**, membre du Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD),
Michel SALLENAVE, ancien membre du Conseil général de l'agriculture, de l'alimentation et des espaces ruraux (CGAAER),
Nathalie BERTRAND, membre du CGEDD,
François MITTEAULT, ancien membre du CGEDD,
Et Dominique ROLLIN, ancien membre du CGAAER

Les projections du GIEC quant aux fortes tensions à venir sur l'accès et le partage de l'eau interrogent en particulier les voies et les moyens d'adaptation de l'agriculture d'ici à 2050. Le ministère de la Transition écologique et solidaire et le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation se sont saisis de cette question, confiant en 2019 au CGAAER et au CGEDD une mission sur les trajectoires d'évolution de l'agriculture à un horizon de trente ans.

Sur la base d'une riche bibliographie et d'un travail de terrain conséquent, il a pu être mis en évidence que la réponse à la crise climatique nécessite à la fois un changement de modèle agricole, plus économe en eau et protecteur des sols, et, partout où cela est possible, un renforcement de la ressource en eau servant à l'irrigation, dans le respect du renouvellement de la ressource et du bon état des milieux. La mission a ainsi proposé un déploiement ambitieux de l'agroécologie et la transition vers une irrigation « de résilience », plus économe en eau. En ce sens, elle a formulé sept recommandations principales dans un projet de feuille de route.

Le ministre de la Transition écologique et solidaire et le ministre de l'Agriculture et de l'Alimentation, en amont du Varenne de l'eau lancé à l'automne 2020, ont confié, en 2019, au CGAAER et au CGEDD² une mission relative aux relations entre l'eau et l'agriculture dans le contexte du changement climatique. Plusieurs missions sur la question de la gestion de cette ressource ou des épisodes de sécheresse ont précédé ce rapport (par exemple, le rapport Bisch CGEDD-CGAAER, 2018 ; le rapport CGAAER « Eau, agriculture et changement climatique : *statu quo* ou anticipation ? », 2017). Sur la

base d'un travail de terrain fourni³ et de la capitalisation de travaux existants, la mission a exploré les voies et les moyens de l'adaptation d'une agriculture diversifiée et encore marquée aujourd'hui par un modèle dominant, et imaginé pour celle-ci des trajectoires possibles d'ici à 2050 en intégrant les projections climatiques du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Elle a également questionné les politiques et la gouvernance de l'agriculture et de l'eau, au regard du choc climatique à venir et du défi qu'il représente pour l'agriculture, les milieux et l'ensemble des usages de l'eau. Sept recommandations principales à destination des acteurs parties prenantes, décideurs, acteurs économiques et collectivités locales, ont été formulées (rapport CGEDD-CGAAER, 2020).

¹ Les propos tenus dans cet article n'engagent que leurs auteurs et en aucun cas les organismes dont ils relèvent. Ils s'appuient sur l'analyse menée dans le rapport AYPHASSORHO H., SALLENAVE M., BERTRAND N., MITTEAULT F., PUJOS Ch. & ROLLIN D. (2020), « Changement climatique, eau, agriculture. Quelles trajectoires d'ici à 2050 ? », rapport CGEDD n°012819-01 et CGAAER n°19056, 333 pages.

² Lettre de commande du 25 mars 2019.

³ Sept études de cas portant sur des territoires et des filières agricoles différents : la viticulture dans l'Hérault, la maïsiculture dans la vallée de l'Adour, l'élevage en Aveyron, l'arboriculture dans le Vaucluse, les grandes cultures dans le Loiret, le maraîchage à Nantes et les cultures industrielles dans l'Aisne.

Enseignements et enjeux

Les travaux du GIEC, qui s'intéressent plus spécifiquement à l'agriculture et à l'environnement, notamment son cinquième rapport (volume 2) traitant « [des] Impacts, [des] Vulnérabilités et [de l']Adaptation » (GIEC, mars 2014) et son rapport intitulé « Changement climatique et sols » (GIEC, avril 2019), permettent de projeter, selon les scénarios, des courbes d'augmentation des températures montrant que l'impact du changement climatique, déjà sensible, sera probablement bien plus fort dans la deuxième partie de ce siècle. Ces changements auront des effets de plus en plus importants (Sauquet et Barreteau, 2017) sur la disponibilité des ressources en eau (milieux humides, rivières, nappes, océans) et se traduiront, demain, par des tensions plus fortes en matière d'accès à la ressource et de partage de l'eau entre les différents usages.

Ces changements sont déjà perceptibles à l'échelle des territoires et des activités agricoles, en particulier de l'agriculture pluviale (c'est-à-dire non irriguée) qui est menacée par une plus grande variabilité des pluies. Ils s'expriment de façon différenciée selon les filières et les milieux, amenant à considérer des stratégies variables en fonction des situations.

En ce qui concerne la gestion de la ressource en eau, la mise en œuvre de ces stratégies appelle le développement d'une gestion collective et multi-usages de la ressource. Si certains territoires comme le Sud-Est ont une forte culture en la matière (voir notamment l'action des associations syndicales autorisées (ASA) en matière d'irrigation), dans d'autres territoires, la gestion intégrée (alliant quantité et qualité) et partagée de l'eau avec d'autres de ses usages qu'agricoles reste encore assez faiblement développée et/ou peu opérante.

Dans ce contexte, l'accès à l'eau apparaît pour le monde agricole comme un facteur déterminant pour son devenir, qu'il s'agisse des cultures à haute valeur ajoutée, du maintien de l'élevage, de celui de la viticulture ou, dans le midi, de l'arboriculture. Il en résulte une demande quasi systématique de sécurisation de l'accès à la ressource en eau, qui se heurte le plus souvent aux réticences d'une partie de la société vis-à-vis de la construction de retenues d'eau, en particulier des associations environnementales qui craignent des atteintes accrues aux milieux aquatiques et sont porteuses d'une vision alternative de l'agriculture, une agriculture plus économe dans son usage de l'eau et moins impactante sur les milieux ; une vision dont les organisations agricoles contestent la viabilité économique.

En ce qui concerne l'évolution de l'agriculture, certaines initiatives territoriales s'ouvrent à de nouvelles démarches de valorisation (par exemple, l'utilisation des eaux usées après traitement) ainsi qu'à des innovations dans les pratiques agronomiques (diversification des assolements, agriculture de conservation des sols, agroforesterie, etc.). Elles témoignent d'une volonté des agriculteurs de relever le défi climatique. Celles-ci restent cependant trop minoritaires pour générer des modifications profondes à l'échelle des filières ou des pratiques plus économes en eau qui seront nécessaires à l'avenir (OCDE, 2015). De plus, les chambres

d'agriculture et les filières agricoles (coopératives et négoce) peinent à se projeter pour proposer des transformations plus profondes de leurs systèmes et restent, dans la plupart des cas étudiés, assez peu mobilisées sur ces questions.

Au vu de ces éléments et sur la base du travail bibliographique et de terrain conduit par ses soins, la mission a considéré que la réponse au changement climatique nécessitait à la fois un changement de modèle agricole, qui soit plus économe en eau et protecteur des sols, et, partout où cela est possible, un renforcement de la ressource en eau servant à l'irrigation, dans le respect du renouvellement de la ressource et du bon état des milieux. Elle a dans ce sens formulé sept recommandations principales.

Principales recommandations pour une agriculture résiliente et la gestion de l'eau face au changement climatique

Accélérer la transformation de l'agriculture pour faire face au changement climatique

Les adaptations de certaines composantes de l'activité agricole ne seront pas à elles seules suffisantes pour être à la mesure des changements attendus du climat à l'horizon 2050 et au-delà. Il faudra le plus souvent envisager une transformation en profondeur, sur plusieurs années, des systèmes d'exploitation pour lesquels le modèle dominant actuel, trop consommateur en eau et en intrants, n'offre pas de perspectives durables. Une évolution plus massive de l'agriculture vers l'agroécologie est attendue, permettant de concilier objectif de production, respect de l'environnement et adaptation au changement climatique, dans le cadre d'un modèle soutenable économiquement, pour les exploitations comme pour les filières.

Cette transformation de l'agriculture ne passera pas par une solution unique au vu de la grande diversité des rapports qui unissent l'agriculture et les territoires, mais devra mobiliser un « panier de solutions », c'est-à-dire combiner un ensemble de leviers adaptés à chaque territoire (Hardelin et Lankoski, 2015), en fonction du contexte climatique, écologique et économique local (génétique, stockage de l'eau dans le sol, développement de l'agriculture de conservation des sols, irrigation « de résilience », infrastructures écologiques, agroéquipements, changements de pratiques et de systèmes de cultures, renforcement de la ressource).

Pour ce faire, des moyens adéquats (financiers, mais pas seulement) et conséquents doivent accompagner ces transitions et le déploiement des composantes du « panier de solutions ». Il s'agit : de mobiliser la recherche ; de rénover le développement agricole et la formation ; d'affecter une partie importante de la PAC à l'accélération de la transition agroécologique, comme le soutien aux investissements facilitant cette transition, le développement d'infrastructures écologiques ou

encore les paiements pour services environnementaux (PSE)⁴ s'appuyant sur des indicateurs de résultat.

Mettre les sols au centre de la stratégie d'adaptation de l'agriculture au changement climatique

Le sol a été insuffisamment pris en compte ces dernières décennies dans les pratiques agricoles. Aujourd'hui, impulsé par la promotion de l'agroécologie qui marque un retour aux fondamentaux de l'agronomie, un changement est perceptible au travers de nombreuses initiatives d'agriculteurs qui mettent le sol au cœur de leurs pratiques, l'érigent en tant que première infrastructure de rétention de l'eau, de séquestration du carbone et de restauration d'une activité biologique favorable aux nutriments des plantes... Le sol revêt donc une importance incontestable dans l'adaptation au changement climatique (Hudson, 1994 ; Libohova *et al.*, 2018).

Il s'agit de promouvoir et de massifier les pratiques d'une agriculture de conservation des sols⁵, de mettre en place des soutiens financiers pour favoriser la séquestration du carbone par les sols, d'intégrer plus fortement l'agriculture dans les documents d'urbanisme et de déployer des « aménagements climatiques » dans les territoires, de promouvoir les formes d'élevage en interaction avec les systèmes de culture (élevage de service ou de transhumance).

Concevoir et mettre en place l'irrigation de demain : vers une irrigation « de résilience »

L'eau demeure un facteur-clé pour sécuriser les productions agricoles et assurer la viabilité économique des exploitations. Face à la raréfaction de la ressource et aux tensions sur le partage de l'eau entre les différents usages, l'irrigation a évolué, notamment et prioritairement sur les bassins en tension. Elle doit tendre vers une irrigation « de résilience », plus économe en eau, centrée sur la sécurisation de la production agricole et contribuant à une plus grande sobriété (Serra Wittling et Molle, 2017). Pour plus d'efficacité, elle doit s'accompagner d'une évolution des assolements, des variétés et des pratiques culturales (travail du sol, en particulier), en visant non pas un objectif maximal de production des cultures mais un optimum faisant converger rentabilité agricole et économie de la ressource en eau.

Cette évolution vers l'irrigation de résilience s'inscrit dans un changement d'ensemble et a vocation à participer et à conforter la transition de l'agriculture vers l'agroécologie, dont la mise en œuvre constitue l'un des éléments centraux de sa nécessaire transformation au regard du changement climatique.

⁴ <https://pse-environnement.developpement-durable.gouv.fr/>

⁵ Cette technique se définit au travers de trois principes : la réduction voire la suppression du travail du sol, la diversification des espèces végétales avec l'allongement des rotations et, enfin, une couverture permanente du sol par les cultures. Le passage d'une agriculture conventionnelle à une agriculture de conservation des sols prend du temps, nécessite une observation et une compréhension des équilibres, présente quelques risques et demande un accompagnement des exploitants et le développement des échanges de ceux-ci avec leurs pairs avant de pouvoir stabiliser les bonnes pratiques.

Ces évolutions devront être accompagnées par le déploiement – et la continuité – d'une stratégie à moyen et long terme des pouvoirs publics, pour permettre aux exploitants de définir et de conduire des trajectoires viables de transition vers ce nouveau type d'irrigation (mobilisation des filières économiques via des appels à projets « Nouvelles filières plus sobres en eau », de la recherche et du développement agricole ; généralisation du pilotage de l'irrigation, de l'achat de matériels, de l'aide visant à assurer une couverture en matière de prise de risques...).

Mettre en place les conditions d'un renforcement acceptable de l'accès à la ressource en eau

La protection de la ressource en eau est un enjeu d'intérêt général, tout comme l'est la mise en valeur de la ressource utilisable voire son développement, sous réserve du respect des équilibres naturels et d'une gestion durable des milieux. Dans ce cadre, différentes possibilités du renforcement de l'accès à la ressource en eau sont à examiner au titre de la constitution du « panier de solutions ». La mobilisation prioritaire du sol en fait partie en tant qu'infrastructure naturelle de stockage de l'eau permettant à l'agriculture de s'adapter au changement climatique et d'évoluer vers des pratiques culturales plus respectueuses de l'environnement. Il s'agit aussi d'examiner la possibilité d'instaurer de nouveaux équilibres dans l'allocation des ressources à l'occasion du renouvellement des concessions hydroélectriques, qui représentent, avec 7 milliards de m³ stockés, un potentiel très important. En matière de sécurisation de la ressource en eau pour l'irrigation, il convient également de privilégier la substitution des prélèvements à l'étiage par des prélèvements réalisés dans des périodes où l'écoulement est plus important (par exemple, en période hivernale). Enfin, il faut renforcer l'efficacité des démarches collectives concertées des projets de territoires pour la gestion de l'eau (PTGE) en leur adossant des contrats multi-acteurs « eau/agriculture » (CGEDD et CGAER, 2018) et en étudiant des solutions innovantes de renforcement de la ressource en eau (réutilisation des eaux usées après traitement, réalimentation de nappes).

Dynamiser la gouvernance territoriale de la gestion de l'eau

La gouvernance de l'eau s'organise dans un contexte où les grandes questions environnementales (climat, biodiversité, épuisement des ressources) s'entrecroisent avec les objectifs d'une valorisation optimale de la ressource et suscitent, par là même, des inquiétudes. Une gestion plus collective de ce « bien commun » apparaît dès lors nécessaire.

Ainsi, la gestion de l'eau se caractérise par une complexité croissante justifiant l'intérêt porté à sa gouvernance. Cette dernière s'appuie sur une importante palette d'outils de nature organisationnelle (préfets coordonnateurs de bassin, agences de l'eau, EPTB...), de planification (SDAGE, SAGE...), de gestion (plans crise sécheresse...), de concertation (commissions,

assises...) ou encore réglementaires. À ce foisonnement d'instruments, s'ajoute la nécessaire articulation de la politique de l'eau avec de nombreuses autres politiques : agricole, énergétique, d'urbanisme, du tourisme, sanitaire... La gouvernance de la ressource en eau a, jusqu'à ce jour, encore peu pris en compte le changement climatique et les risques associés. Pour y pallier, il s'agira : de renforcer et d'outiller cette gouvernance, en priorité les PTGE (outils d'animation-médiation, formations, réseau métier, cellule d'appui MTES-MAA, lien avec SAGE) pour assurer leur réussite ; de faciliter l'émergence des maîtrises d'ouvrage pour assurer la conduite des projets d'infrastructures de gestion quantitative de l'eau ; de renforcer la cohérence de la gestion de l'eau pour les grands bassins versants (État (préfets de sous-bassins) et collectivités (EPTB)) ; de mettre en place des organismes uniques de gestion collective (OUGC) dans tous les bassins soumis à des tensions fortes et de renforcer juridiquement l'action de ces organismes.

Connecter plus fortement entre eux la recherche, le développement agricole, les filières et les agriculteurs

Pour permettre la transition agricole, il importe de refonder le développement agricole (instituts techniques, chambres) à travers le renforcement du travail en réseau en y associant les groupes d'agriculteurs innovants, l'utilisation de nouveaux outils (réseaux sociaux...) ou encore l'évolution du conseil agricole. Il conviendra également de renforcer les « recherches actions » portant sur les transformations et les démarches participatives pour accompagner et généraliser les bonnes pratiques innovantes ; de poursuivre les transformations engagées en matière de formation agricole : agroécologie, agronomie, expérimentations de terrain...

Enfin, il est important de porter un discours commun sur l'eau et l'agriculture

Des éléments de doctrine partagés sur l'eau et l'agriculture sont à établir entre le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation et le ministère de la Transition écologique et doivent être promus au travers d'un effort commun de pédagogie et d'information/communication. Il est proposé, à cet effet, de mettre en place un groupe de travail *ad hoc* qui soit permanent et commun aux deux ministères, pour établir ces éléments de doctrine partagés et assurer leur suivi ; d'appuyer ce suivi, à l'échelle nationale, sur un réseau d'observatoires de l'agriculture et du changement climatique ; et de produire au niveau du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation une feuille de route sur l'adaptation de l'agriculture au changement climatique, notamment dans le domaine de l'eau, en cohérence avec le corps de doctrine partagé et la politique de l'eau portée par le ministère de la Transition écologique.

Perspectives et conclusion

Le changement climatique, dont les effets sont déjà perceptibles, aura des conséquences lourdes sur l'agriculture comme sur les ressources en eau et les milieux

aquatiques au cours des prochaines décennies. Au regard de l'importance de ces changements à venir, les conditions de la transition de l'agriculture comme celles de son accompagnement devront faire l'objet d'une attention particulière de la part des pouvoirs publics (développement et conseil agricoles, financements...) et d'un volontarisme politique affirmé portant sur le temps long et prenant en compte les contraintes de marché et de viabilité économique des filières. La cohérence interne des objectifs agroécologiques et de production donnés à l'agriculture doit faire partie des priorités politiques. Le développement des ressources en eau mobilisables, dans le respect de leur renouvellement et des milieux et de la biodiversité, nécessite d'être poursuivi au service de cette transition agricole, dans une logique de gestion multi-usages.

Compte tenu de leur ampleur, la mise en œuvre de ces transformations suppose la mobilisation de l'ensemble des leviers disponibles, notamment financiers.

Bibliographie

- AYPHASSORHO H., SALLENAVE M., BERTRAND N., MITTEAULT F., PUJOS Ch. & ROLLIN D. (2020), « Changement climatique, eau, agriculture. Quelles trajectoires d'ici à 2050 ? », rapport CGEDD n°012819-01 et CGAAER n°19056, 333 pages.
- BENOIT G. *et al.* (2017), « Eau, agriculture et changement climatique : statu quo ou anticipation ? Synthèse et recommandations », rapport CGAAER n°16072, 66 pages.
- BISCH P.-E., HUBERT L., MAILLEAU Cl., DENIER-PASQUIER Fl. & SERVANT L. (2018), « Cellule d'expertise relative à la gestion quantitative de l'eau pour faire face aux épisodes de sécheresse », rapport CGEDD n°011865-01 et CGAAER, mai, 131 pages.
- GIEC (2014), « Changements climatiques 2014, vol. 2 – Incidences, Adaptation et Vulnérabilité », mars, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar5_wgII_spm_fr-2.pdf
- GIEC (2019), « Changement climatique et sols », avril, <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- HARDELIN J. & LANKOSKI J. (2015), "Climate Change, Water and Agriculture: Challenges and Adaptation Strategies", *EuroChoices* 14, n°2, <https://doi.org/10.1111/1746-692X.12085>
- HUDSON B. D. (1994), "Soil organic matter and available water capacity", *Journal of Soil and Water Conservation* 49 (2), March, pp. 189-194.
- LIBOHOVA Z. *et al.* (2018), "Reevaluating the effects of soil organic matter and other properties on available water-holding capacity using the National Cooperative Soil Survey Characterization Database", *Journal of Soil and Water Conservation* 73.4, pp. 411-421.
- OCDE (2015), « Changement climatique, eau et agriculture : vers des systèmes résilients. Études de l'OCDE sur l'eau », 115 pages, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264235076-fr>
- SAUQUET E. & BARRETEAU O. (2017), « Conséquences du changement climatique sur le niveau des ressources en eau », intervention à l'Assemblée nationale, Commission DDAT, http://www2.assemblee-nationale.fr/static/15/commissions/CDD/2017.09_note_Irstea_impactCC_eau_VF.pdf
- SERRA WITTLING C. & MOLLE B. (2017), *Évaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation*, Irstea, 149 pages, hal-02608073.

Biodiversité et climat : les approches fondées sur la nature

Par Denis COUVET

Président de la FRB (Fondation pour la recherche sur la biodiversité)

Et Hélène SOUBELET

Directrice de la FRB

Une meilleure gestion des écosystèmes pourrait contribuer à une atténuation significative du changement climatique. Pour y parvenir un certain nombre de conditions doivent être réunies : préserver et restaurer la diversité biologique de ces écosystèmes, y compris celle des communautés animales et microbiennes ; faciliter l'adaptation de ces écosystèmes aux changements globaux en maintenant des corridors et en réduisant les perturbations ; et tenir compte de la diversité des territoires en intégrant les savoirs et les valeurs associés.

Introduction

La capacité des écosystèmes à atténuer le changement climatique a été mise en exergue par les décideurs. Dès 2015, une initiative scientifique nommée « 4 pour mille », lancée au moment de la COP21, sous l'égide de l'Inra, de l'IRD et du Cirad, estime qu'en stockant dans les sols, grâce à des pratiques appropriées, un supplément de carbone correspondant à 4 pour mille, nous pourrions théoriquement compenser toutes nos émissions de carbone d'origine anthropique. D'autres constats attestent que les écosystèmes absorbent actuellement près de la moitié de nos émissions de gaz à effet de serre. Le maintien de cette capacité, voire son amélioration (grâce à une meilleure protection, gestion et restauration de ces écosystèmes) permettraient d'accroître d'un quart le captage de ces émissions, soit 10 GT de CO₂ en plus par an (Girardin *et al.*, 2021). La plupart des écosystèmes sont concernés : les écosystèmes forestiers, aquatiques (zones humides, coraux, fonds marins...) et les agroécosystèmes. Néanmoins, concevoir les écosystèmes simplement à travers les flux de carbone est simpliste et peut conduire à des erreurs de gestion. Ainsi, au niveau des agroécosystèmes, le déploiement des biocarburants, lorsqu'ils favorisent la déforestation et/ou perturbent les systèmes agricoles vivriers des pays du Sud, peut conduire, par ricochet, à d'autres émissions de GES.

Afin d'éviter de telles erreurs, il faut concevoir les pilotes de ces écosystèmes comme des « solutions fondées sur la nature », devant combiner atténuation, adaptation et préservation de la biodiversité. Dans cet article, nous examinons les trois enjeux scientifiques et pratiques qui en découlent : préserver la diversité biologique, envisager la transformation des écosystèmes et intégrer la diversité des territoires.

Diversité biologique des écosystèmes : des enjeux fonctionnels

La diversité biologique d'un écosystème comprend leur diversité spécifique – génétique et fonctionnelle –, et dépend de l'abondance des différentes communautés d'êtres vivants.

Rôle des communautés animales et microbiennes

Cette diversité favorise les capacités des écosystèmes en matière d'absorption du carbone et d'adaptation au changement climatique. Ainsi, bien que les carnivores ne participent pas directement à la capture des gaz à effet de serre, leur présence fonctionnelle favorise la végétation en contrôlant l'abondance des herbivores, évitant par là même le surpâturage ; elle amortit également les effets des perturbations, évitant ainsi les basculements des écosystèmes (voir, par exemple, Rasher *et al.*, 2020). Les communautés microbiennes des sols améliorent les capacités de rétention et d'absorption par les plantes de l'eau et des nutriments, ce qui est un atout majeur lorsque ces éléments deviennent des facteurs limitants au regard d'un carbone dont la disponibilité augmente. En conséquence, les forêts monospécifiques d'eucalyptus, si elles présentent une forte croissance initiale, maximisant ainsi une absorption rapide du carbone, ont aussi l'inconvénient de raréfier la présence des animaux et des microorganismes des sols, ce qui les rend à la fois peu résilientes face aux aléas environnementaux et très consommatrices en eau, et ce au détriment des écosystèmes voisins.

Bénéfices collatéraux de la diversité biologique : la multifonctionnalité des écosystèmes

Cette diversité biologique, présente à toutes les échelles – au sein des différentes communautés animales, végétales et microbiennes, au sein même des espèces (diversité génétique) –, s'accompagne d'avantages collatéraux liés à l'effet généralement positif de la diversité sur le fonctionnement des écosystèmes, à travers les nombreuses et diverses fonctions écologiques qu'ils assurent (Dias *et al.*, 2019). Cette diversité a une valeur d'option, associée au principe de précaution, en tant qu'elle ouvre le champ des potentialités des écosystèmes, notamment sur le plan de leur capacité d'adaptation et de transformation.

Dans le domaine de la santé humaine, animale et végétale, elle réduit à la fois la probabilité d'émergence et la vitesse de dissémination des maladies infectieuses affectant les humains, les végétaux et les animaux. Cela peut se concrétiser au travers de plusieurs mécanismes, dont la dilution¹ d'animaux plus sujets à transmettre des pathogènes infectieux au sein d'animaux moins ou pas du tout vecteurs de ces mêmes agents pathogènes, ce qui réduit la probabilité de passage des maladies associées de l'animal vers les humains ; l'acquisition par les humains d'un microbiote de la peau, de l'intestin ou de la sphère buco-nasale plus diversifié, qui constitue dès lors une barrière efficace contre les microorganismes pathogènes et renforce l'immunité générale. La diversité biologique contribue également à la qualité esthétique : une valeur inspiratrice et d'apprentissage, qui est un élément essentiel de la qualité des relations sociales et de la santé physique et mentale. Elle répond aussi à des préoccupations éthiques : préserver la nature pour sa valeur intrinsèque.

Faciliter l'adaptation des écosystèmes aux changements globaux

Au-delà du maintien et de la restauration de la diversité biologique, y compris fonctionnelle, un enjeu majeur est celui de l'adaptation des écosystèmes à des changements globaux, notamment climatiques, qui sont à la fois intenses et rapides.

Les défis de l'adaptation des écosystèmes aux changements globaux

Cette adaptation peut être lente. Les mangroves ont ainsi mal répondu aux rapides changements passés du niveau des mers (Saintilan *et al.*, 2020). Le dégel du permafrost pourrait, quant à lui, s'accompagner d'émissions massives de gaz à effet de serre, si la décomposition de la matière organique stockée dans ces sols gelés est plus rapide que l'essor des arbres sur ces

mêmes sols. Un problème systémique est la perturbation du fonctionnement des écosystèmes résultant des discordances des réponses d'espèces fonctionnant en réseau : des dates de floraison avancées par rapport à celles d'émergence des insectes associés, dissociation des symbioses algues-coraux... Les arbres, éléments-clés pour l'absorption du carbone par les écosystèmes terrestres, posent eux aussi un problème majeur : leur réponse phénologique est plus lente et plus faible que celle des espèces herbivores et carnivores avec lesquelles ils interagissent ; leur vitesse de déplacement est également plus faible.

Un défi encore plus important est d'éviter – ou d'anticiper ? – le basculement possible des écosystèmes dans de nouveaux régimes de végétation. Il pourrait en être ainsi des milieux semi-arides, méditerranéens notamment, où les forêts pourraient se muer en garrigues, en maquis, en chaparrals ou encore en steppes. Le dilemme ici est de savoir s'il s'agit de préparer ou non la biodiversité à s'adapter à ce nouvel état : par exemple, en favorisant l'implantation d'espèces adaptées à un nouveau régime, par exemple de type steppique dans le cas méditerranéen.

De la référence historique aux espèces néo-natives et exotiques

Afin de répondre à ces défis, un objectif est apparu évident : celui de maintenir, voire de restaurer l'écosystème historique, peu anthropisé et composé d'espèces autochtones. Cet écosystème est qualifié parfois de « naturel », car il reflète une adaptation aux conditions environnementales locales, à leurs variations, plus que ne le fait l'écosystème anthropisé. La canopée des îles des Caraïbes illustre la pertinence de cette approche. Les arbres autochtones dotés d'une forte capacité de résistance aux perturbations – cyclones et feux – ont été remplacés au cours du dernier millénaire, concomitamment à l'arrivée des humains, par des essences qui sont certes plus adaptées aux besoins immédiats de l'homme, mais qui sont aussi plus inflammables (Fall *et al.*, 2021). Ces nouvelles espèces constituent des écosystèmes que l'on peut donc qualifier de « dégradés » en raison de leur forte inflammabilité.

Les changements globaux par leur rapidité ébranlent la pertinence de cette référence historique. Des espèces allochtones peuvent être mieux adaptées aux nouvelles conditions locales et assurer les fonctions écologiques essentielles des écosystèmes : c'est le cas des espèces « néo-natives », c'est-à-dire présentes dans des écosystèmes proches géographiquement et environnementalement (Essl *et al.*, 2019). Plus radicalement, les espèces « exotiques », issues d'écosystèmes éloignés, pourraient rendre un nouveau régime écosystémique – dont l'émergence est rendue inéluctable par les changements globaux – plus favorable à terme à l'essor de la biodiversité. C'est ce que suggère l'exemple des moules invasives des grands lacs américains. Entraînant dans un premier temps des coûts très lourds pour les villes riveraines liés à la dégradation des canalisations et à la quasi-disparition des moules autochtones, cette espèce invasive a, dans un second temps, favorisé la diversification des autres espèces

¹ [https://fr.wikipedia.org/wiki/Dilution_\(%C3%A9co%C3%A9pid%C3%A9miologie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Dilution_(%C3%A9co%C3%A9pid%C3%A9miologie))

vivant dans ces lacs et le retour de ceux-ci à un état plus oligotrophe, à un régime moins sensible aux apports externes et en trop grande quantité de nutriments en provenance de l'agriculture et de l'industrie intensives de la « Rust Belt » américaine (Li *et al.*, 2021).

Retour à la pertinence de la diversité biologique

Autre conséquence, est apparue l'idée de « migration assistée » : les humains aident les espèces à se déplacer. C'est une réponse de la société civile qui a émergé spontanément, devançant sur ce point l'expertise scientifique. Néanmoins, assister la migration de quelques espèces et, de ce fait, les favoriser, est risqué. Un choix pertinent des espèces et de leurs génotypes suppose de savoir anticiper ce que pourraient, ou plutôt, devraient être les écosystèmes à venir. Les tentatives de contrôle biologique ou d'introduction de nouvelles espèces afin d'assurer le contrôle des ravageurs des cultures, se sont souvent traduites par des dégâts inattendus, parfois supérieurs à la menace initiale.

Plus intégratifs que la migration assistée de quelques espèces, le maintien et, si besoin, la restauration de la diversité biologique réduiraient les risques précédemment évoqués. Cette recherche de diversité se fonde sur la pertinence et la puissance des processus d'adaptation du vivant, avec ou indépendamment de l'intervention des humains (voir, sur ce point, la notion de valeur d'option évoquée *supra*). De plus, se préoccuper de diversité biologique est d'autant plus crucial que tout écosystème soumis à une forte sélection tend spontanément à perdre de la diversité, et ce d'autant plus que les changements globaux sont intenses et rapides (Millar et Stephenson, 2015). En relation avec cet objectif de diversité, deux autres spécificités écosystémiques semblent importantes à préserver : les corridors écologiques reliant entre eux des écosystèmes riches en biodiversité et permettant de réduire la fragmentation des milieux en facilitant le déplacement des espèces ; et la rareté de l'aléa que sont les perturbations, leur régularité ainsi qu'une trop grande fréquence entraînant *a contrario* une diminution de la diversité, en favorisant les espèces adaptées au rythme de changement imposé (Perino *et al.*, 2019).

Intégrer la diversité des territoires, des valeurs et des savoirs

Enfin, il est nécessaire d'intégrer la diversité, aussi bien biologique que sociale, de territoires en interaction. Ainsi, les écosystèmes, naturels et anthropisés, ont des propriétés fonctionnelles encore largement ignorées des experts, et parfois connues des seuls sachants locaux. Il en est ainsi du « zai », une méthode traditionnelle de reforestation qui serait moins coûteuse et plus efficace que les méthodes proposées par les experts pour (re)construire une « muraille verte » dans le Sahel (Carey, 2020).

Les enjeux d'une

« gouvernance transformative »

Cette notion de « gouvernance transformative » souligne la nécessité d'intégrer dans la recherche de solutions certaines valeurs, connaissances et institutions (Lavorel *et al.*, 2019). Alors qu'il s'agit dans chaque territoire, pour les humains comme pour le reste du vivant, de choisir entre résister, s'adapter, se transformer ou se retirer (Mach et Siders, 2021), il importe également d'intégrer les particularités de ces territoires, des usages qui s'y attachent, des manières dont les humains interagissent avec la biodiversité en fonction des densités humaines, de l'importance relative des écosystèmes « naturels » – forêts et zones humides, dont les cas ont été évoqués plus haut –, et des écosystèmes anthropisés, notamment agricoles... Et il s'agit, notamment, de se préoccuper des questions sociales, de faire en sorte que les institutions, les techniques et les valeurs sollicitées favorisent la diversité biologique, et ne privilégient pas à l'inverse, souvent implicitement, l'uniformisation et la standardisation des paysages.

Un cas pouvant illustrer localement et rapidement les enjeux majeurs de cette gouvernance est celui de la « migration transformative », ou migration humaine : cette nécessité qui émerge lorsque se retirer semble incontournable, notamment face à des aléas climatiques extrêmes, comme la montée du niveau des mers ou la dégradation des sols. Dans le premier cas, un milliard d'humains pourraient être concernés ; dans le second, ce sont entre 50 et 700 millions d'humains (Scholes *et al.*, 2018). Des migrations dues à la montée des eaux sont d'ores et déjà observées dans le delta du Mississippi et au Bangladesh, la comparaison entre ces deux cas très contrastés, notamment en termes de densité humaine, sont riches d'enseignements.

Bibliographie

- CAREY J. (2020), "News Feature: The best strategy for using trees to improve climate and ecosystems? Go natural", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117(9), pp. 4434-4438.
- DÍAZ S. *et al.* (2019), "Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change", *Science* 366.6471.
- ESSL F., DULLINGER S., GENOVESI P., HULME P. E., JESCHKE J. M., KATSANEVAKIS S. & BACHER S. (2019), "A conceptual framework for range-expanding species that track human-induced environmental change", *BioScience* 69(11), pp. 908-919.
- FALL P. L. *et al.* (2021), "Human arrival and landscape dynamics in the northern Bahamas", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118(10).
- GIRARDIN C. A. *et al.* (2021), *Nature-based solutions can help cool the planet-if we act now*.
- LAVOREL S. *et al.* (2019), "Mustering the power of ecosystems for adaptation to climate change", *Environmental Science & Policy* 92, pp. 87-97.
- LI J. *et al.* (2021), "Benthic invaders control the phosphorus cycle in the world's largest freshwater ecosystem", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118(6).

MACH K. J. & SIDERS A. R. (2021), "Reframing strategic, managed retreat for transformative climate adaptation", *Science* 372(6548), pp. 1294-1299.

MILLAR C. I. & STEPHENSON N. L. (2015), "Temperate forest health in an era of emerging megadisturbance", *Science* 349(6250), pp. 823-826.

PERINO A. *et al.* (2019), "Rewilding complex ecosystems", *Science* 364(6438).

RASHER D. B. *et al.* (2020), "Keystone predators govern the pathway and pace of climate impacts in a subarctic marine ecosystem", *Science* 369(6509), pp. 1351-1354.

SAINTILAN N. *et al.* (2020), "Thresholds of mangrove survival under rapid sea level rise", *Science* 368.6495, pp. 1118-1121.

SCHOLES R. *et al.* (2018), *Summary for policymakers of the assessment report on land degradation and restoration of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*, IPBES secretariat, Bonn, Germany, 44 pages.

Les extrêmes climatiques : perceptions et enjeux sociaux et politiques

Par Solange MARTIN

Sociologue au Secrétariat du Haut Conseil pour le climat

Alors que le changement climatique se concrétise dans le monde et en France, deux années de pandémie n'ont pas relégué la préoccupation environnementale à l'arrière-plan. Particulièrement tangibles, destructeurs et redoutés, les événements climatiques extrêmes contribuent à ancrer la réalité de l'urgence climatique dans l'opinion publique. Amenés à se reproduire de façon plus fréquente et plus intense dans le futur, ces événements rappellent également la nécessité de savoir ce que produisent ces nouveaux risques environnementaux sur les individus et les sociétés. Les sciences humaines, sociales et économiques permettent d'éclairer les multiples enjeux de cette situation. L'accroissement de l'éco-anxiété mais aussi des tensions et des conflits souligne l'urgence d'y faire collectivement face. Que chacun fasse sa part ne doit pas masquer le fait que l'urgence climatique est aussi, et même surtout, politique et sociale.

Comment nos concitoyens perçoivent-ils les extrêmes climatiques ? Ces événements ont-ils un effet sur les perceptions individuelles et les représentations sociales du changement climatique ? À quelles conditions ces perceptions et représentations peuvent-elles se traduire par des pratiques d'atténuation et d'adaptation et non par du déni, de la sidération, voire du cynisme face au réchauffement planétaire ?

Dans un premier temps, les enquêtes d'opinion, en particulier lorsqu'elles sont barométriques¹ et donc à « biais constants »², apportent des éléments de réponse à ces questions. Elles mettent en lumière des diffé-

rences entre les répondants et/ou entre des périodes en fonction de certains déterminants sociodémographiques, culturels ou contextuels. Dans un deuxième temps, les enseignements apportés par plusieurs sciences humaines et sociales au travers de différentes approches de la perception des risques seront mobilisés pour pouvoir expliquer ces résultats. Cela permettra alors de préciser les enjeux pour les individus et les sociétés que pose la survenue d'événements extrêmes climatiques de plus en plus fréquents et intenses.

Les dérèglements climatiques, et notamment les événements climatiques extrêmes, rendent le réchauffement crédible et préoccupant aux yeux du grand public

Lorsqu'on leur demande ce qui pourrait leur faire penser que le changement climatique est bien réel, seulement 4 à 5 % des Français mentionnent les dires des scientifiques et 0 à 2 % les informations diffusées par les médias³. Ces niveaux sont très faibles et ne s'expliquent pas par un manque de confiance du public envers ces deux sources d'information distinctes. En effet, « médias » et « sciences » ou « scientifiques » se retrouvent respectivement aux deux extrêmes de l'échelle dans les enquêtes de confiance⁴, alors qu'ici,

¹ L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) conduit depuis l'an 2000 ce qui est le seul baromètre français sur les représentations sociales du changement climatique. L'enquête est menée auprès d'un échantillon représentatif de la population française métropolitaine de 1 000 à 1 500 personnes, lequel est complété, selon les éditions, par des sur-échantillons représentatifs de populations spécifiques (les jeunes de 15 à 30 ans, les agriculteurs, les ultramarins, les dirigeants d'entreprises comptant plus de 50 salariés, les élus locaux, etc.). Il s'agit des enquêtes « Représentations sociales de l'effet de serre et du réchauffement climatique » réalisées par GLS-OpinionWay et Daniel Boy pour l'Ademe, entre 2000 et 2020.

² Les sondages d'opinion sont sujets à de multiples biais. Ils enregistrent des déclarations dont ils ne vérifient pas la véracité. Bien qu'imparfaits, ils restent particulièrement éclairants en ce qui concerne les attitudes et les représentations, et ce d'autant plus qu'ils sont conduits de façon récurrente. Les enquêtes d'opinion répétées ou « baromètres » étudient les évolutions sur le temps long. La relative stabilité des réponses et, par contraste, les évolutions significatives observées peuvent être corrélées à des caractéristiques sociodémographiques et politico-culturelles des individus eux-mêmes ou du contexte de passation des enquêtes. Ce type d'enquêtes permet alors de gagner en robustesse scientifique, tout en se prémunissant contre les effets de loupe sur le présent.

³ BOY D., « Les représentations sociales de l'effet de serre et du réchauffement climatique », rapport d'analyse [2014-2017], étude réalisée pour l'Ademe.

⁴ OpinionWay pour Sciences Po/Cevipof, « Baromètre de la confiance politique/Vague 12 », février 2021.

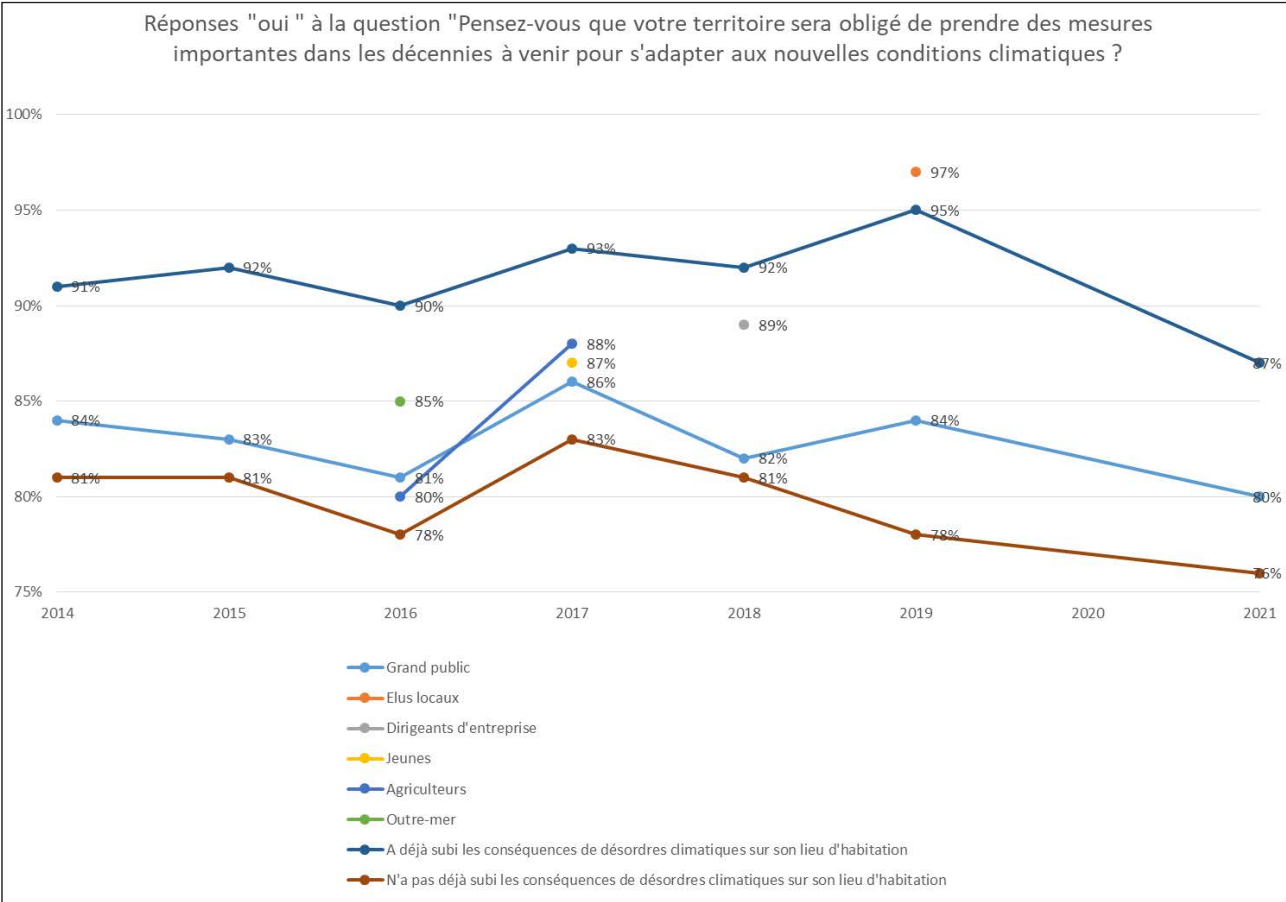


Figure 1 – Sources : données Ademe, « Représentations sociales du changement climatique », étude réalisée par OpinionWay pour l'Ademe, sur la période 2014-2021. Traitement des données réalisées par HCC et l'autrice.

tous deux sont relégués en bas de tableau. C'est la parole institutionnelle, abstraite et rationnelle d'où qu'elle vienne, qui peine à pénétrer les croyances.

Au contraire, les changements dans les cycles saisonniers, la fonte des glaciers, la montée des mers, les catastrophes naturelles, le ressenti personnel font croire au réchauffement climatique pour les deux tiers des répondants. Ce sont des éléments tangibles, des perceptions sensorielles et non des cognitions abstraites. De fait, le réchauffement planétaire, perçu comme l'augmentation de la température moyenne mondiale par rapport à l'ère préindustrielle sous l'effet de l'accumulation dans l'atmosphère des gaz émis par les activités humaines, lesquels renforcent le phénomène naturel et salubre de l'effet de serre, est une notion pour le moins complexe... Un ours dérivant en pleine mer sur un bout de banquise, l'avancement de la date des vendanges, un ouragan, des inondations..., ce sont là des faits plus facilement appréhendables et donc bien plus convaincants.

La prise de conscience des enjeux climatiques, au travers de ces impacts visibles, se traduit dans l'opinion par un très large consensus sur la nécessité de l'adaptation

80 % ou plus des Français interrogés sur toute la période 2014-2021 pensent que leur territoire va

devoir s'adapter dans les décennies à venir⁵. Ils sont encore plus nombreux à le penser (au moins 90 %), lorsqu'ils déclarent avoir déjà subi les conséquences de désordres climatiques sur leur lieu d'habitation. Certaines populations exposées, telles que les ultramarins ou les agriculteurs, sont, elles aussi, très majoritairement convaincues de la nécessité de l'adaptation, comme le sont les acteurs en responsabilité : dirigeants d'entreprise et, surtout, élus locaux.

Reconnaître l'existence de désordres climatiques et la nécessité de s'y adapter ne suffit pas cependant en matière d'atténuation

Contrairement aux États-Unis, la négation pure et simple de l'existence d'un réchauffement climatique est peu fréquente en France. D'autres échappatoires ou avatars du climato-scepticisme sont en revanche encore bien présents dans notre pays. Une première « voie de sortie » consiste à considérer les désordres climatiques comme naturels, immémoriaux et, donc, inéluctables. En 2021⁶, un Français sur cinq (et même un sur trois chez les plus de 55 ans) privilégie toujours la réponse, « il s'agit uniquement d'un phénomène

⁵ OpinionWay pour l'Ademe, « Représentations sociales du changement climatique » (période 2014-2021).
⁶ OpinionWay/BOY D., « Représentations sociales du changement climatique », étude réalisée pour l'Ademe, 2021.

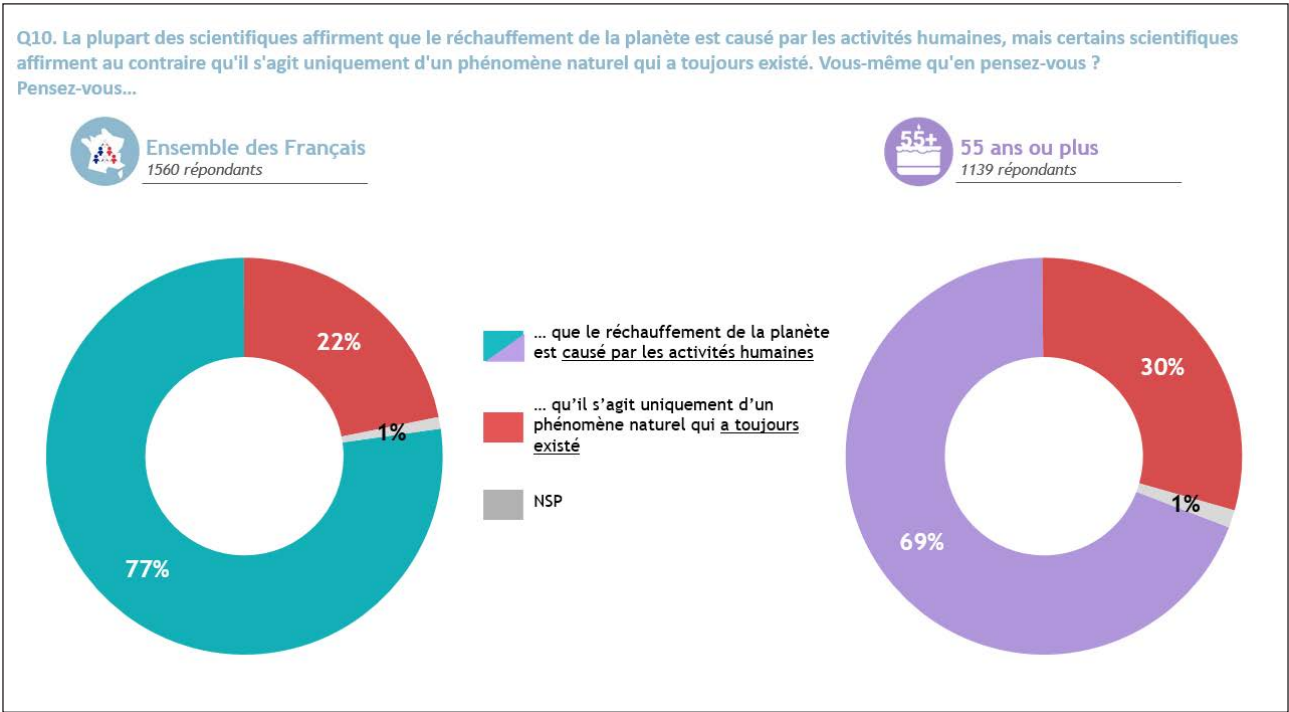


Figure 2 – Source : « Représentations sociales du changement climatique », étude réalisée par OpinionWay pour l'Ademe, 2021.

naturel qui a toujours existé », face à l'option, « le réchauffement de la planète est causé par les activités humaines ». C'est l'aspect cyclique des réchauffements *versus* les périodes de glaciation qui sous-tend cette réponse. L'extrême rapidité des changements climatiques actuels, qui les différencie des changements passés, n'est ici pas prise en compte.

Lorsque l'on ajoute une troisième modalité de réponse en termes d'incertitude et que l'on cible « les désordres » climatiques actuels, c'est désormais quatre Français sur dix qui doutent ou nient leur origine anthropique. Ils étaient toutefois majoritaires en 2001, avec 64 %. Si

l'on regarde dans le détail, on observe que la posture véritablement sceptique, c'est-à-dire celle privilégiant l'incertitude, est restée relativement stable (entre 15 et 20 %). En revanche, les partisans de la réponse « Des phénomènes naturels comme il y en a toujours eu » sont beaucoup moins nombreux aujourd'hui : 21 % en 2021 contre 49 % en 2001. Sur cette question, l'opinion publique a clairement évolué.

Ces progrès sont sans doute à relier aux avancées des sciences du climat en matière d'attribution. Les climatologues sont désormais en capacité de considérer et de dire que certains événements n'auraient pas pu se

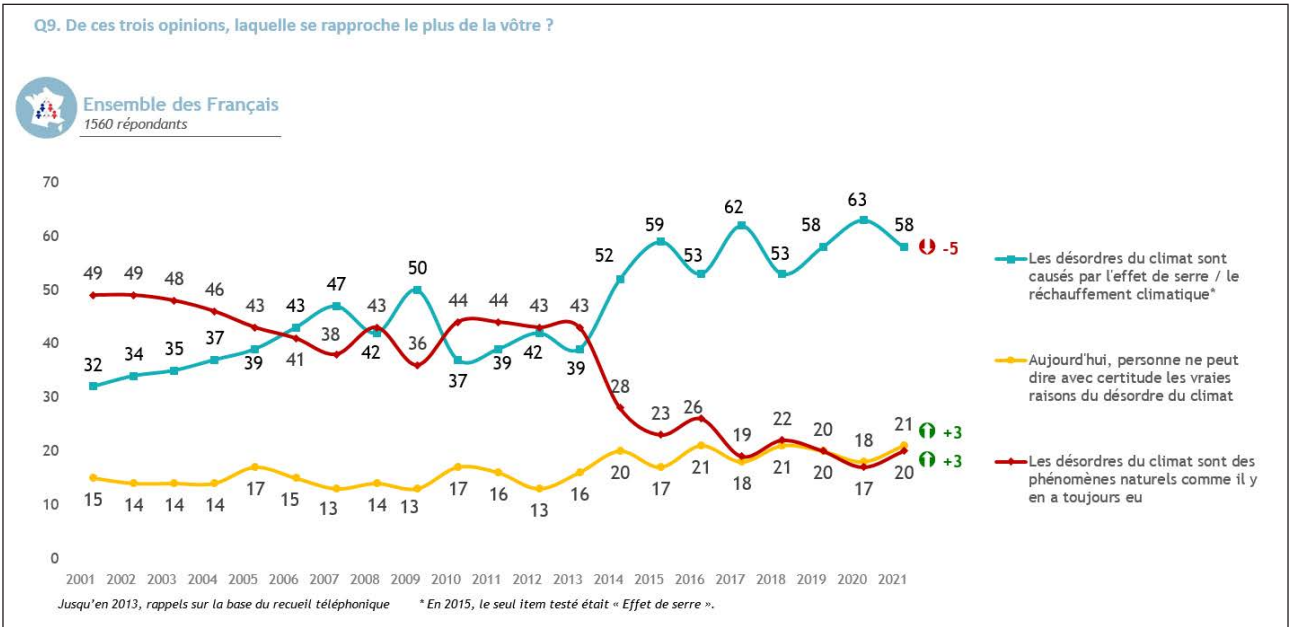


Figure 3 – Source : « Représentations sociales du changement climatique », étude réalisée par OpinionWay pour l'Ademe, 2021.

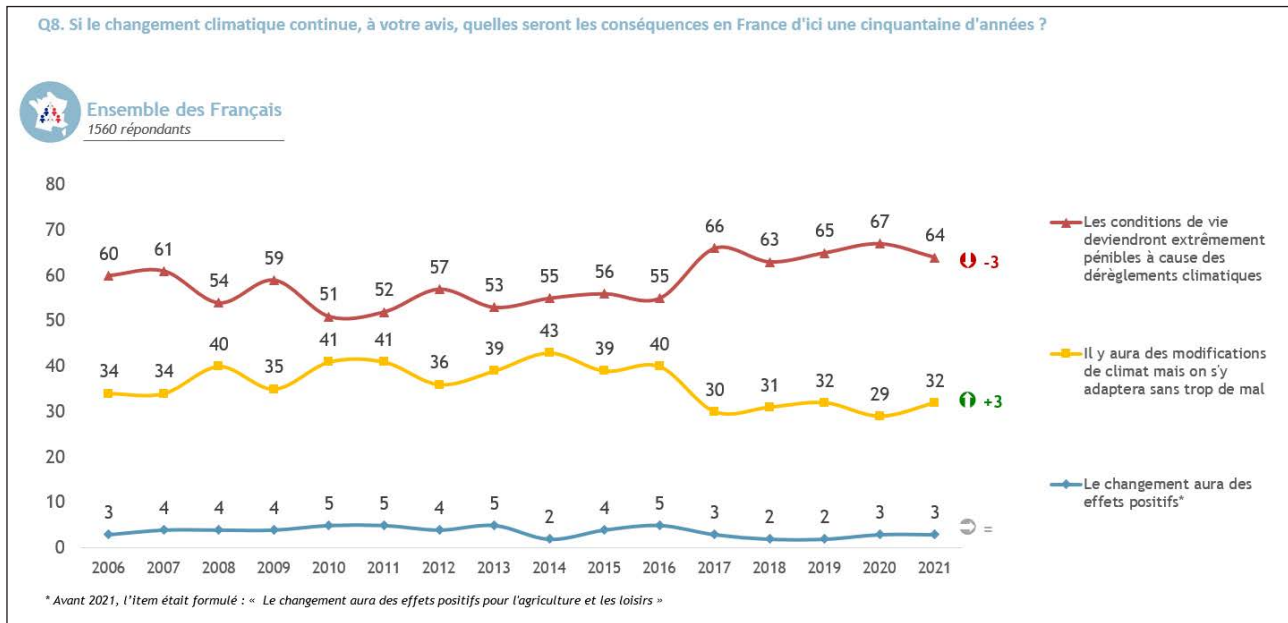


Figure 4 – Source : « Représentations sociales du changement climatique », étude réalisée par OpinionWay pour l'Ademe, 2021.

produire sans le changement climatique. Il n'y a pas si longtemps, les scientifiques interrogés dans les médias à la suite d'un événement climatique extrême (ouragan, sécheresse, inondation, feux de forêt, canicule, etc.) refusaient de se prononcer sur une occurrence unique et renvoyait le journaliste et le grand public à une augmentation de la fréquence ou de l'intensité de ces phénomènes. Compte tenu des preuves accumulées, les climatologues n'hésitent plus aujourd'hui à franchir ce pas, permettant la conjonction nouvelle entre deux phénomènes nécessaires aux prises de conscience : le grand public constate la survenue de désordres climatiques tout à fait tangibles et inédits, et les scientifiques en désignent clairement la cause.

Une dernière échappatoire réside encore dans la relativisation des conséquences des changements climatiques au travers d'une minimisation des risques, mais aussi une surestimation de la facilité de l'adaptation. En effet, les extrêmes climatiques ne rendent le changement climatique crédible, préoccupant et nécessitant des politiques d'atténuation que si l'origine anthropique ainsi que sa dangerosité sont reconnues et correctement évaluées. Or, un tiers (32 % en 2021) des Français considère que l'on s'adaptera sans trop de mal aux modifications de climat, en France, d'ici cinquante ans. C'est particulièrement vrai pour les plus âgés (38 % chez les 65 à 74 ans et 50 % chez les plus de 75 ans), mais aussi, et c'est à souligner, pour les personnes en responsabilité, dont les élus locaux (52 % en 2019, contre 32 % pour la population générale), les dirigeants d'entreprise (48 % en 2018, contre 31 %) et les agriculteurs (51 % en 2017, contre 30 %). Inversement, d'autres catégories de la population sont moins nombreuses que la moyenne à considérer que l'adaptation sera facile : les jeunes de 15 à 30 ans (24 % en 2017, contre 30 %), les ultramarins (29 % en 2016, contre 40 %) et 25 % de ceux qui ont déjà subi des désordres climatiques sur leur lieu d'habitation contre 37 % de ceux qui n'ont pas connu ce type de désagrément en 2021.

Les répondants que l'on peut qualifier de climato-sceptiques⁷ restent significatifs en nombre, quoique minoritaires par rapport à une majorité de la population qui, elle, s'inquiète

Plusieurs caractéristiques socio-démographiques et aussi culturelles distinguent les climato-sceptiques du reste de la population. Ils sont en moyenne plus âgés, moins diplômés et se situent plus à droite de l'échiquier politique. L'importance des facteurs culturels et idéologiques, que l'on constate également dans d'autres pays comme les États-Unis⁸, indique que ces attitudes ne sont pas réductibles à un déni face à une situation angoissante. Il s'agirait plutôt de la résolution d'une dissonance cognitive par rapport à des représentations du monde peu compatibles avec la réalité du changement climatique : la foi dans le progrès technique, dans les sociétés libérales, dans l'économie de marché, etc. La contestation des causes et des conséquences du changement climatique est aussi la seule possibilité, moralement tenable, de refuser la nécessité ou le contenu des politiques climatiques d'atténuation⁹. Cette minorité significative reste à convaincre en adoptant ses propres valeurs et cadres de pensée : sécurité, souveraineté,

⁷ Typologie élaborée en croisant plusieurs questions et en considérant ceux qui nient la cause anthropique du réchauffement, qui se refusent à attribuer les désordres climatiques au réchauffement, tout en remettant en cause l'existence d'un consensus scientifique sur la question et en considérant que les scientifiques exagèrent les risques. Étude réalisée par Daniel Boy pour l'Ademe, « Représentations sociales du changement climatique », rapport d'analyse [2014-2021].

⁸ Pew Research Center, "Americans, Politics and Science Issues – Chapter 2: Climate Change and Energy Issues", 1^{er} juillet 2015, <https://www.pewresearch.org/science/2015/07/01/chapter-2-climate-change-and-energy-issues/>

⁹ POTTIER A. (2011), « Le climato-scepticisme. Réflexions sur la confusion des genres », *Futuribles*, n°380, décembre, pp. 27-40.

conservation des patrimoines, retour aux savoirs et pratiques d’antan, lutte contre les migrations climatiques, etc.

À l’opposé, la majorité des Français sont inquiets, et le sont de plus en plus depuis 2016. Ils considèrent à 64 % que les conditions de vie en France deviendront de plus en plus pénibles d’ici à cinquante ans, si le changement climatique continue. Leurs premières sources d’inquiétude résident dans l’augmentation des catastrophes naturelles et le réchauffement des températures en été – c’est-à-dire, justement, des extrêmes climatiques – ; deux craintes devançant les migrations de population, les conflits sociaux, politiques et géostratégiques et le développement de nouvelles maladies.

Pour couronner le tout, le pessimisme – ou la lucidité – est élevé, avec 65 % des répondants qui estiment que le réchauffement climatique ne sera pas limité à des niveaux acceptables d’ici à la fin du siècle. On ne s’étonnera pas que, dans ces conditions, un nouveau terme et une nouvelle pathologie mentale soient apparus dans le débat public jusqu’à faire les gros titres des magazines actuels, il s’agit de l’éco-anxiété ou la solastalgie. Cette situation interroge les réponses à apporter non seulement à la question climatique elle-même, mais aussi à ses impacts sur le bien-être psychique des populations, en particulier des jeunes, alors que 75 % d’entre eux

considèrent leur avenir comme effrayant et que 45 % souffrent d’éco-anxiété¹⁰.

Que sait-on de la perception des risques et de leurs effets sur les individus et les sociétés, et que peut-on en conclure au regard des enjeux actuels ?

Les sciences humaines et sociales ont montré que les perceptions individuelles et les représentations sociales diffèrent de l’évaluation scientifique des caractéristiques et de la gravité des risques. Les études en la matière trouvent d’ailleurs leur origine dans les désaccords entre experts et profanes sur les dangers des technologies, des risques naturels, des pratiques dangereuses, des addictions, etc. En effet, ces désaccords compliquent considérablement la mise en œuvre des projets et des politiques en rapport avec ces risques, qu’il s’agisse de les prendre ou de les réduire. Ainsi l’article pionnier du

¹⁰ HICKMAN C., MARKS E., PIHKALA P., CLAYTON S., LEWANDOWSKI E., MAYALL E., WRAY B., MELLOR C. & VAN SUSTEREN L. (2021), "Climate anxiety in children and young people and their beliefs about government responses to climate change: a global survey", *The Lancet*, vol. 5, Issue 12, e863-e873, December 01, [https://www.thelancet.com/journals/lanph/article/PIIS2542-5196\(21\)00278-3/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanph/article/PIIS2542-5196(21)00278-3/fulltext)

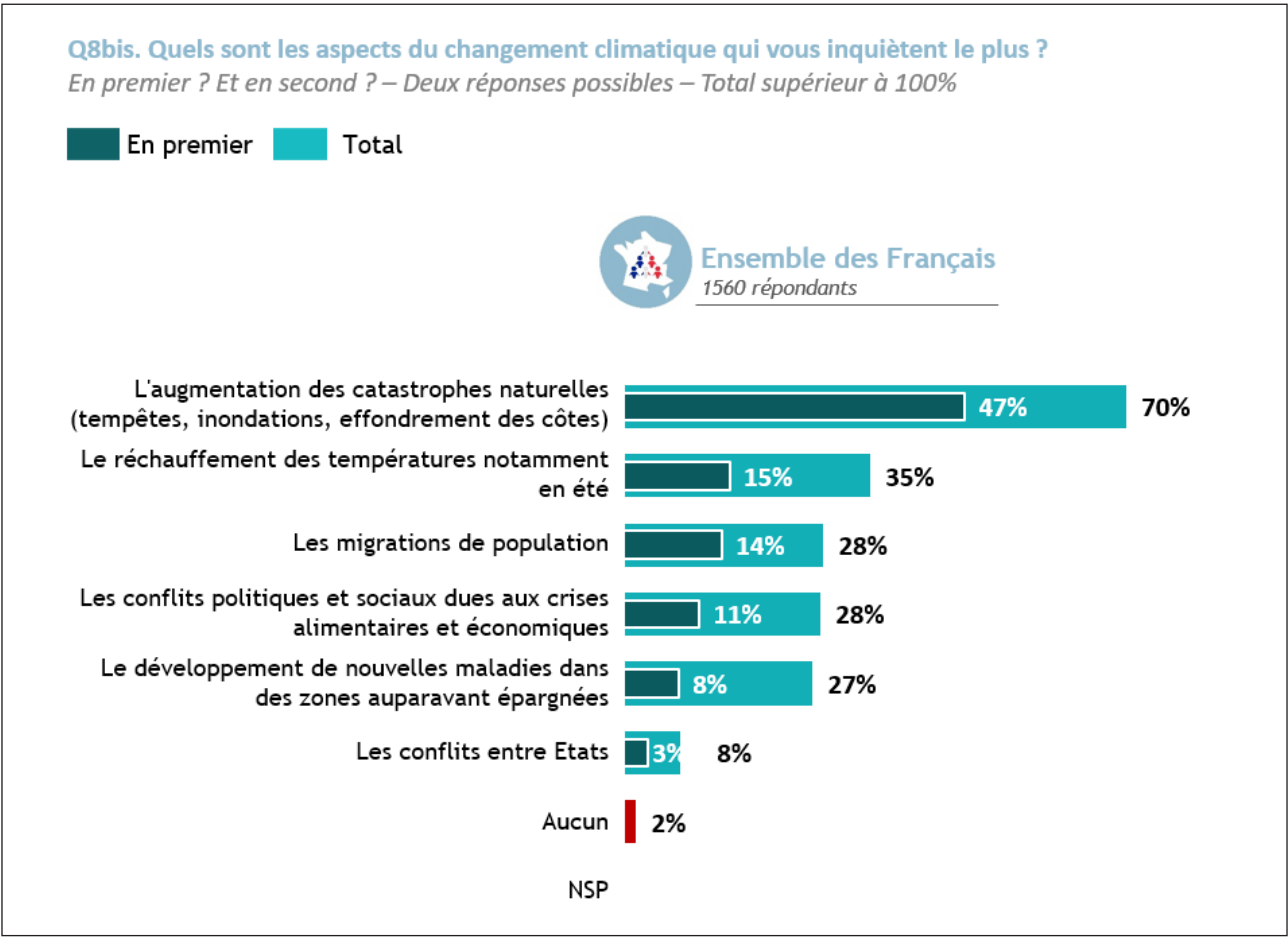


Figure 5 – Source : « Représentations sociales du changement climatique », étude réalisée par OpinionWay pour l’Ademe, 2021.

physicien Chauncey Starr, écrit en 1969¹¹, conclue-t-il que les individus acceptent des risques mille fois plus grands s'ils sont volontaires (conduire une voiture, par exemple) que s'ils sont subis (une catastrophe nucléaire). Cette irrationalité serait alors réductible en apportant des informations correctes et adéquates.

La tentation est toujours importante chez les scientifiques, dont les climatologues, de parier sur un surcroît d'informations exactes pour mobiliser les individus, les sociétés et les gouvernements. Pourtant, de nombreuses recherches ultérieures faites en sciences humaines et sociales ont démontré les limites de cette approche cognitive. Il ne s'agit pas ici de relativiser les faits scientifiques robustes par rapport à de « fausses » controverses¹² et autres opinions « de comptoir », mais bien de saisir les limites des connaissances pour transformer les réalités sociales. Croire et savoir sont deux choses distinctes. Jean-Pierre Dupuy avait bien montré, et avant lui Hans Jonas et Gunther Anders, que face à des problèmes environnementaux identifiés depuis longtemps, le problème n'est pas le savoir.

Croire et agir sont également deux choses distinctes. Même lorsque les attitudes sont conformes aux savoirs scientifiques, il existe un décalage important entre ces dernières et les comportements¹³. Autrement dit, on peut être conscient, parfaitement sensibilisé, et continuer pourtant à devoir vivre dans une passoire thermique, à prendre la voiture ou l'avion pour son travail ou ses loisirs, à faire des barbecues avec ses proches... Comment expliquer ces décalages cumulatifs entre savoir, croyance et action ?

Les premiers travaux psychométriques¹⁴ ont montré que les individus utilisent des heuristiques pour trier et simplifier l'information, ce qui entraîne des biais de jugement et de raisonnement. Par la suite, les recherches se sont concentrées sur le rôle des affects, de la personnalité de l'individu et de son état émotionnel¹⁵. Ces travaux en psychologie et en économie comportementale mettent en lumière plusieurs caractéristiques qui

rendent les risques liés aux extrêmes climatiques particulièrement problématiques. En effet, ces événements climatiques sont craints, car ils sont catastrophiques. Véritables épées de Damoclès, ils sont certains dans leur fréquence et leur intensité accrues, nous disent les climatologues, tout en étant inconnus au regard de leurs modalités exactes, temporelles et géographiques, de leur survenue. Ils sont à la fois inédits, tels que les tornades au Luxembourg, en Belgique ou en France¹⁶, tout en étant mémorables, à l'instar de la canicule de 2003.

À ces caractéristiques directement liées aux événements eux-mêmes, s'en ajoutent d'autres qui dépendantes de la réponse qui est apportée pour en réduire les causes et/ou en limiter les conséquences. En effet, les extrêmes climatiques sont plus ou moins contrôlables en fonction des efforts d'atténuation et d'adaptation consentis. Ils sont également plus ou moins subis ou choisis en fonction des niveaux d'émissions de GES des uns et des autres. Ils sont donc particulièrement injustes, car les responsabilités sont inégales, tout comme le sont les capacités à y faire face et à s'y adapter. Plus encore, ils s'avèrent immoraux, si l'on considère les efforts des industries pétrolières¹⁷ pour les minimiser, ainsi que le décalage entre le luxe des plus gros émetteurs et la survie des plus faibles émetteurs. Enfin, la confiance dans celui ou ceux qui génère(nt) le risque ou celui ou ceux qui doi(ven)t le gérer ont des conséquences importantes sur la perception des risques. Or, la France se caractérise par un faible niveau de confiance envers les autorités publiques, en particulier aux échelles de gouvernance les plus élevées (échelles européenne et nationale *versus* locale)¹⁸.

Perceptions, attitudes et comportements ne sont pas séparables du contexte social

Les travaux en anthropologie et en sociologie ont ainsi montré que les perceptions du risque sont socialement construites par les institutions, les valeurs culturelles¹⁹. La communication sur les risques passe également par des intermédiaires (individus, groupes, médias, etc.) qui trient l'information, lui donnent un sens et amplifient ou,

¹¹ STARR C. (1969), "Social benefit versus technological risk", *Science* 165, 3899, 1232-8, doi: 10.1126/science.165.3899.1232.

¹² À cet égard, les outils de la sociologie des sciences qui se focalisent sur les controverses, et donc sur les énoncés et les incertitudes, tendent à faire le jeu des « marchands de doute » ou « des fabricants du mensonge », pour reprendre les termes de Naomie Oreskes, Éric Conway et Stéphane Foucart. Il est ici nécessaire de bien distinguer entre des controverses scientifiques fabriquées par des intérêts économiques hostiles à une régulation de leurs activités, et donc d'origine exogène au champ scientifique lui-même, et les controverses scientifiques endogènes, qui émergent effectivement de l'activité autonome de ce champ caractérisé par la validation par les pairs (BOURDIEU P. (2001), *Sciences de la science et réflexivité*, Paris, Raisons d'agir.

¹³ GASPARD A. & MARTIN S. (2016), *Changer les comportements, faire évoluer les pratiques sociales vers plus de durabilité. L'apport des sciences humaines et sociales pour comprendre et agir*, Angers, Ademe, coll. « Expertises », <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/changer-les-comportements.pdf>

¹⁴ KAHNEMAN D. & TVERSKY A. (1979), "Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk", *Econometrica*, vol. 47, n°2, mars, pp. 263-291.

¹⁵ SLOVIC P. (1987), "Perception of Risk", *Science* 236, pp. 280-285, <http://dx.doi.org/10.1126/science.3563507>

¹⁶ http://www.lessentiel.lu/fr/news/grande_region/story/une-tornade-a-sevi-tout-pres-du-luxembourg-15614100 ; https://www.francetvinfo.fr/meteo/tornade/tornade-au-luxembourg-quelques-blesses-et-des-degats-materiels_3572029.html ; <https://www.keraunos.org/actualites/faits-marquants/2021/tornade-saint-nicolas-de-bourgueil-19-juin-2021-indre-et-loire-centre-val-de-loire>

¹⁷ Déjà, en 2006, l'Académie royale des sciences britannique envoyait une lettre à Exxon pour leur demander d'arrêter de financer des *think tanks* climato-sceptiques (<https://www.theguardian.com/environment/2006/sep/20/oilandpetrol.business>). Des accusations corroborées par d'autres études ultérieures, voir : <https://www.ucsusa.org/resources/climate-deception-dossiers>

¹⁸ Étude réalisée par OpinionWay pour Sciences Po/Cevipof, « Baromètre de la confiance politique/Vague 12 », février 2021.

¹⁹ DOUGLAS M. & WILDAVSKY A. (1982), *Risque et culture*, Los Angeles, Presse de l'Université de Californie.

au contraire, atténuent les risques perçus²⁰. C'est particulièrement le cas en ce qui concerne le changement climatique. On peut ainsi montrer en France, comme aux États-Unis²¹, que la préoccupation envers le changement climatique suit les mobilisations politiques et médiatiques sur ce sujet (prix Nobel de la paix décerné à Al-Gore et au GIEC en 2007, Conférence de Paris en 2015 ou, à l'inverse, « Climategate » de Copenhague en 2010).

Ces perceptions, socialement construites, ont des incidences sur les comportements, les pratiques et les politiques publiques, ce qui génère des impacts sociaux et économiques, qui, à leur tour, augmentent ou diminuent les risques. Il existe ainsi de multiples effets d'entraînement et de rétroaction entre perceptions, actions (ou non actions) individuelles et collectives, privées et publiques, et évolution du risque climatique lui-même. Dès lors, le risque est aussi d'individualiser les causes et les réponses à l'urgence climatique, de sur-responsabiliser les individus²², de se focaliser sur la santé mentale..., au lieu de traiter le problème de façon collective.

Comment faire alors que les extrêmes climatiques sont appelés à se multiplier et à s'intensifier ? La situation actuelle est problématique à plus d'un titre

Une première difficulté, qui vaut pour la conduite de la transition comme pour d'autres problématiques conjuguant risques et science – une pandémie, par exemple –, est celle qui renvoie à la société du risque décrite par Ulrich Beck²³, et à son pendant, une société de l'analyse du risque²⁴. La première fait face à des

controverses quasi systématiques sur les risques collectifs énoncés au nom de vérités scientifiques, la seconde institutionnalise l'expertise portant sur ces risques afin de pouvoir décider sur la base de fondements rationnels. Jusqu'à quand sera-t-il possible de gouverner et de conduire la transition avec des institutions publiques bénéficiant du minimum nécessaire de légitimité, des vérités objectivées scientifiquement et une participation effective des parties prenantes dans des dispositifs de démocratie participative ?

Deuxième difficulté : les sciences comportementales et cognitives concluent à des effets psychologiques importants de l'exposition au risque dans l'enfance et à l'âge adulte²⁵. Conditions de vie précaires et stress majeurs accroissent la préférence pour le présent, réduisent le niveau de confiance sociale, augmentent la violence²⁶, en particulier envers les femmes²⁷, ainsi que l'appétence pour des dirigeants dominants, même s'ils semblent peu dignes de confiance. Or, la transition climatique implique de la coopération, de la participation, de la projection à long terme, de la solidarité, etc.

Troisième difficulté : le slogan « Faire un geste pour la planète » n'a jamais sonné aussi faux à l'heure où une action collective majeure est indispensable pour réduire les causes et les conséquences des nouveaux risques climatiques. La « planète » Terre survivra sans problème, les écosystèmes un peu moins, l'humanité devrait y arriver mais au prix de plus ou moins de pertes. En revanche, nos sociétés démocratiques, la paix sociale, la paix mondiale sont très clairement menacées. Le climat change et bascule dans des extrêmes. En sera-t-il de même pour nos sociétés ?

²⁰ KASPERSON R. E., RENN O., SLOVIC P., BROWN H. S., EMEL J., GOBLE R., KASPERSON J. X. & RATICK S. (2005), "The Social Amplification of Risk: A Conceptual Framework", in *Social Contours of Risk*, London, Routledge.

²¹ BRULLE R. J., CARMICHAEL J. & JENKINS C. (2012), "Shifting Public Opinion on Climate Change: An Empirical Assessment of Factors Influencing Concern over Climate Change in the U.S., 2002-2010", *Climatic Change*, vol. 114, n°2, september, pp. 169-188.

²² DUBUISSON-QUELLIER S. & MARTIN S. (2019), « Face à l'urgence climatique, méfions-nous de la sur-responsabilisation des individus », *The conversation*, <https://theconversation.com/face-a-lurgence-climatique-mefions-nous-de-la-sur-responsabilisation-des-individus-116481>

²³ BECK U. (1986), *Risk Society. Towards a New Modernity*, University of Munich, Germany.

²⁴ DEMORTAIN D. (2019), « Une société (de l'analyse) du risque ? », *Natures Sciences Sociétés* 2019/4, vol. 27, pp. 390-398, doi: 10.1051/nss/2020005, <https://www.cairn.info/revue-natures-sciences-societes-2019-4-page-390.htm>

²⁵ CHEVALLIER C., « 11. Vivre dans un environnement risqué : quels impacts pour la psychologie ? », dans SENIK Claudia (éd.), *Sociétés en danger. Menaces et peurs, perceptions et réactions*, Paris, La Découverte, « Recherches », 2021, pp. 197-208 : <https://www.cairn.info/---page-197.htm>

²⁶ BLAKESLEE D., CHAUREY R., FISHMAN R., MALGHAN D. & MALIK S. (2021), "In the heat of the moment: Economic and non-economic drivers of the weather-crime relationship", *Journal of Economic Behavior & Organization*, Vol. 192, pp. 832-856, <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2021.11.003> ; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167268121004698>

²⁷ CASTAÑEDA CAMEY I., SABATER L., OWREN C. & BOYER A. E. (2021), *Gender-based violence and environment linkages: summary for policy makers*, WEN J. (ed.), Gland, Switzerland, IUCN, <https://portals.iucn.org/library/node/49850>

Géopolitique de l'adaptation au changement climatique : la survie et la puissance des nations

Par Jean-Michel VALANTIN

Think tank The Red (Team) Analysis Society

L'adaptation au changement climatique est un enjeu géopolitique, car cette adaptation – ou la mal-adaptation – est en train de devenir le moteur de la distribution internationale de la puissance.

Afin d'étudier la réalité de cette évolution, ainsi que les interdépendances qui en émergent, nous nous proposons dans cet article d'étudier la façon dont la Russie et la Chine entrent dans ce processus.

Cette étude de cas permet aussi de mettre en évidence la dimension militaire de cet enjeu, où la géophysique et la géopolitique se mêlent pour recomposer les modalités de la puissance.

La géopolitique est une dimension fondamentale de l'adaptation au changement climatique, car elle est celle de la guerre, de la coopération, de l'usage international de la violence armée et de la survie ou de la mort des personnes comme des collectifs. Or, la crise bioclimatique planétaire mettant en jeu la vie et la mort des nations, l'adaptation de ces dernières s'inscrit dans la distribution internationale de la puissance, tout en la remettant en cause.

Le cas de la Russie

La situation en Russie illustre de façon particulièrement forte cette convergence des enjeux. Ainsi, durant l'été 2021, comme c'est de plus en plus régulièrement le cas depuis une dizaine d'années¹, des feux monstrueux se déchaînent en Sibérie. L'un d'eux s'étend dans la forêt au sud de Nijni-Novgorod et menace Rasov. Depuis la période soviétique, cette ville secrète est dédiée à l'élaboration des systèmes d'armes nucléaires et, depuis quelques années, à celles des armements hypersoniques. Le méga-incendie de juillet 2021 menaçait ainsi certaines des plus importantes capacités technologiques russes.

Afin de contenir le feu, le Kremlin mobilise ses forces armées afin de venir en soutien de celles de la sécurité civile. Après des jours et des nuits d'un combat acharné, les forces russes parviennent à maîtriser le feu, sauvant ainsi la ville et préservant les enjeux qui s'y rattachent. Or, ce méga-incendie, un parmi les nombreux à avoir ravagé la Sibérie, est un signal de l'aridification en cours de la région en raison de la crise

bioclimatique. Ce processus, en cours depuis plus de 55 ans, transforme les forêts du sud de la Sibérie en bombes incendiaires potentielles pendant la période estivale².

Comme d'autres pays, la Russie doit faire face à des méga-incendies réguliers, voire répétés, depuis la fin des années 2000. C'est au cours de cette même période que, dans sa zone arctique, le Kremlin a lancé le développement économique et la militarisation du littoral sibérien.

Depuis cette période, le gouvernement russe utilise les effets du réchauffement particulièrement rapide de la zone arctique pour ouvrir la « Route du nord », qui s'étend du détroit de Béring à la Norvège, et qui longe le littoral sibérien toujours plus libre de glace pendant la période estivale. La Route du nord est utilisée par un nombre croissant de convois maritimes, en particulier chinois, pour atteindre l'Europe du nord et l'Atlantique nord. À cela s'ajoute l'exploitation de nouveaux gisements pétroliers et gaziers littoraux et *off shore* dans la zone économique exclusive russe³.

Aussi, depuis 2014, cette zone économique qui se situe au nord de la Sibérie accueille les premières plateformes de forage pétrolier et gazier. Ces premières exploitations ont ensuite attiré des *joint-ventures* sino-russes, ainsi que de larges investissements étrangers, en particulier chinois, dans les nouvelles exploitations gazières géantes dénommées Yamal 1 et 2.

¹ STRUZZIK Ed (2020), "The Age of Megafires: The World Hits a Climate Tipping Point", *Yale Environment* 360, September 17.

² KHARLAMOVA N. *et al.* (2019), "Present Climate Development in the Southern Siberia: a 55 year observations record", IOP Conferences Series: Earth and Environmental Science.

³ VALANTIN Jean-Michel (2017), *Géopolitique d'une planète dérégulée*, Paris, Le Seuil, rééd. avril 2022.

Afin d'affirmer sa souveraineté sur cette zone, le ministère de la Défense russe réhabilite les bases militaires de l'archipel sibérien, en installe de nouvelles ainsi que des systèmes d'armes littoraux, et expérimente régulièrement ses nouvelles générations de missiles. L'armée russe y multiplie les manœuvres de grande ampleur, invitant les forces chinoises à y participer, comme ce fut le cas en septembre 2018.

Ces différents exemples, de natures et d'échelles très différentes, illustrent la façon dont, sur une planète que le changement climatique bouleverse, la Russie s'adapte, de façon à demeurer une grande puissance. Pour ce faire, les forces économiques et militaires du pays sont mobilisées afin de répondre aux urgences, tout en se livrant à un aménagement du territoire tirant avantage du réchauffement. Les grands axes de cette adaptation apparaissent ainsi comme étant de nature profondément géopolitique. Ils s'inscrivent dans la culture stratégique russe ancrée dans la préoccupation historique de maintenir la sécurité et le statut de cet immense pays s'étendant de l'Europe à l'Asie, tout en maintenant sa continuité territoriale et politique⁴.

Cette préoccupation tant stratégique qu'existentielle est exacerbée par la violence toujours plus forte des effets du changement climatique⁵ sur ce « pays fait par le froid⁶ ». Or, parvenir à élaborer et à mettre en œuvre les stratégies de sécurité, mais aussi de sécurisation de cette immense nation est un enjeu d'une ampleur inégalée dans l'histoire humaine, dans la mesure où les enjeux liés à la sécurité internationale et à la géopolitique sont désormais indissociables de ceux liés à des changements géophysiques et biologiques majeurs d'une rapidité et d'une violence sans égales dans l'histoire humaine et planétaire⁷.

Néanmoins, la façon dont les autorités russes élaborent des stratégies permettant de transformer les effets du changement climatique dans l'Arctique en supports de puissance, mais aussi en vecteurs d'influence internationale, met en évidence le caractère central de la dimension géopolitique propre à l'adaptation au changement climatique.

Adaptation, violence et changement permanent en Chine et dans le reste de l'Asie

Cependant, le succès ou l'échec à venir de la Russie va aussi dépendre de l'issue que connaîtra son principal voisin, la Chine. Or, la Chine est particulièrement vulnérable, et ce de façon systémique, au changement climatique. C'est le mode même de son développement,

depuis la fin des années 1970, qui a fait émerger un système de vulnérabilités⁸.

La croissance démographique et urbaine chinoise a entraîné le développement d'un réseau de mégapoles de plusieurs dizaines de millions d'habitants, de mégapoles de 5 à 10 millions d'habitants et d'un réseau dense de « petites villes » comptant de 1 à 5 millions de personnes. Cette croissance urbaine a accompagné la croissance industrielle, dont les rejets polluants transforment l'environnement chinois en piège toxique. Or, les effets en chaîne du changement climatique mettent en danger tout autant le tissu urbain que l'approvisionnement en eau et l'alimentation et la santé de 1,4 milliard de personnes⁹.

Par ailleurs, la hausse toujours plus rapide du niveau des océans menace les zones littorales, les zones portuaires et les estuaires qui sont des zones de peuplement d'interface entre la Chine et le reste du monde.

Menaces et stratégies alimentaires

La dépendance croissante, en particulier alimentaire, de la Chine vis-à-vis du reste du monde, à travers le développement des segments intercontinentaux de la Nouvelle route de la soie, devient une menace quand les conditions politiques et climatiques mettent en danger les flux de matières, d'énergie et de produits agricoles provenant des pays exportateurs.

La vulnérabilité alimentaire de la Chine est aggravée par celle de son agriculture. L'érosion des sols, leur pollution et celle des nappes phréatiques ainsi que la désertification mettent en danger la productivité de ce secteur. Par ailleurs, la Plaine du nord, principale zone de production, va certainement devenir la région la plus touchée par le réchauffement dans les années à venir. Il faut se rappeler qu'en 2006, un épisode de sécheresse particulièrement violent a touché les zones rizicoles, entraînant une diminution suffisamment forte de la productivité pour forcer le gouvernement chinois à importer du riz.

À la suite de cet épisode, l'État chinois, suivi par de puissants opérateurs privés, a lancé une politique mondiale d'achats et de location de terres arables dans le monde entier, allant du Laos à l'Ukraine, de l'Éthiopie à la Picardie. Afin de garantir la sécurité de ces productions et de leur exportation vers la Chine ainsi que des importations de produits alimentaires en provenance de pays tiers, la Chine fait appel à des sociétés de sécurité privées. Pékin utilise aussi l'arme de la dette afin de s'implanter dans de grandes zones de production agricole, comme l'Argentine.

Le dérèglement planétaire étant un danger global, du point de vue de Pékin, l'adaptation à cette nouvelle contrainte planétaire peut être exploitée par les autorités chinoises pour maintenir le statut de la Chine en

⁴ VALANTIN Jean-Michel (2020), « L'aigle, le dragon et la crise planétaire », Paris, le Seuil.

⁵ GUSTAFSON Thane (2021), "Klimat, Russia in the age of climate change", Cambridge Mas., Harvard University Press.

⁶ TOUCHARD Laurent (2011), *La Russie et le changement climatique*, Paris, L'Harmattan.

⁷ LYNAS Mark (2020), *Our Last Warning: 6 degrees of climate emergency*, London, Fourth Estate.

⁸ McNEIL J. R. & ENGELKE Peter (2016), *The Great Acceleration. An Environmental History of The Anthropocene since 1945*, Belknap Press.

⁹ Voir note de bas de page 4.

tant que grande puissance. Afin d'y parvenir, les stratégies chinoises utilisent la « Grande fonte » et la « Grande sécheresse » à leur avantage.

Vers une grande guerre asiatique de l'eau ?

La Chine transforme la rapide intensification du changement climatique en avantage stratégique hybride, et ce à l'échelle planétaire. Le changement climatique accélère et amplifie les rythmes de fonte des calottes glaciaires himalayennes et de la banquise arctique, et déstabilise la calotte glaciaire antarctique.

L'accélération de la fonte des glaciers himalayens, qui alimentent les grands fleuves asiatiques, dont dépendent 3,5 milliards de personnes, parmi lesquelles 1,4 milliard de Chinois. Or, l'ensemble de l'Asie du Sud-Est et du Sud connaît un développement économique et démographique particulièrement rapide. Cette dynamique continentale nécessite l'accès à des quantités d'eau douce toujours plus importantes. Dans ce contexte, la Chine s'est lancée dans une « course aux barrages » dans l'Himalaya, qui s'accompagne d'une militarisation active des grandes zones de fonte, dont le plateau tibétain, et qui l'oppose à l'Inde. En d'autres termes, la Chine déploie une « Grande stratégie hydrique » à l'échelle de l'Asie, prenant ainsi le risque de déclencher une « Guerre de l'eau » susceptible d'impliquer les pays les plus peuplés de la planète.

Ce risque de conflit est particulièrement important avec l'Inde. Il s'est traduit, par exemple, par l'annonce faite par Pékin en 2020 de la construction d'un barrage sur le Yarlung Tangpo, dans une des vallées du plateau tibétain. Or, ce fleuve continue sa course en Inde, pour devenir le Brahmapoutre, l'une des principales artères fluviales indiennes.

Ce projet d'aménagement hydrique en haute altitude s'accompagne de la construction de séries d'ouvrages militaires, de routes stratégiques et de fortifications, ainsi que de l'installation de garnisons du côté chinois de la frontière sino-indienne. La Chine et l'Inde massent des milliers d'hommes de troupe en haute altitude. Depuis 2020, l'Armée populaire de libération chinoise multiplie les manœuvres aériennes dans l'Himalaya. C'est dans ce contexte qu'en juin 2020, a eu lieu un très violent combat au corps à corps entre des patrouilles chinoises et indiennes.

Pour la Chine, ce barrage fait partie d'une série de projets hydrauliques visant à sécuriser les quantités d'eau nécessaires à la concrétisation de l'ambitieux projet hydraulique Nord-Sud. Ce projet, élaboré durant la période maoïste, vise à transférer d'importantes masses d'eau du Sud humide vers le Nord, qui est le principal front pionnier du développement économique chinois. Ce barrage d'une puissance de 60 gigawatts doit aussi participer au développement du mix énergétique chinois et de la stratégie chinoise d'atténuation du changement climatique par la baisse de sa consommation de charbon¹⁰.

Par ailleurs, ce projet, s'inscrivant dans le contexte de l'adaptation au changement climatique, prend dès lors une dimension existentielle majeure. Les régions du Nord sont les espaces où, alors que les populations ouïghours font l'objet d'une vive répression, s'implantent les nouvelles concentrations industrielles. C'est aussi dans cette région que sont établies les infrastructures de transport de la Nouvelle route de la soie qui relie la Chine à l'Asie centrale et à la Russie, et où est installé le terminal du gigantesque gazoduc russe « Power of Siberia ». Alimenter cette immense région en eau revient à rendre possible l'absorption, au moins partielle, du choc climatique, tout en maintenant le potentiel économique du pays.

Par ailleurs, la militarisation par la Chine de ses projets de barrages se prolonge dans les projets de mégabarrages en préparation en amont de l'Indus conduits en partenariat étroit avec le Pakistan. Si ce partenariat hydraulique s'inscrit dans le cadre des accords propres au couloir économique défini entre la Chine et le Pakistan pour ce segment de la Nouvelle route de la soie, il a des prolongements aussi implicites que massifs pour l'adaptation de la Chine au changement climatique. Le Pakistan et l'Inde ayant des relations historiquement hostiles, ces projets de barrages vont alimenter le risque de confrontation entre l'Inde, le Pakistan et la Chine, tout en dégradant les possibilités pour l'Inde, l'autre géant asiatique, de s'adapter au changement climatique.

L'un de ces barrages sera construit dans la région du Gilgit Batilsan, qui est proche de la Chine et est l'objet d'un conflit permanent entre l'Inde et le Pakistan. Le gouvernement indien est particulièrement inquiet face à la conduite de ces projets de barrages dans la région du Cachemire, qui est l'une des principales sources d'alimentation des fleuves indiens.

En d'autres termes, la course aux barrages, leur militarisation et leur inscription dans des jeux d'alliances stratégiques font de la Chine un « hegemon hydraulique ». Cela confère à Pékin une influence majeure sur les conditions de vie mêmes des immenses populations de l'Asie du Sud et du Sud-Est. Dans la même dynamique, Pékin devient ainsi capable de menacer l'Inde de possibles « chantages à l'eau », tout en favorisant le Pakistan, l'adversaire historique de l'Inde.

Dans ce contexte géopolitique et climatique, la disruption du cycle de la mousson est un atout climatique stratégique pour la Chine, car le contrôle de l'amont des grands fleuves asiatiques à travers son réseau de barrages lui permet d'installer les autres pays asiatiques dans une dépendance encore plus forte vis-à-vis d'elle. Le pouvoir hydro-militaire chinois est ainsi en train de se diffuser et de s'imposer à l'Inde, au Pakistan, au Bangladesh, au Laos, au Cambodge, à la Thaïlande, à la Birmanie, tout en renforçant la capacité chinoise à s'adapter au changement climatique et en limitant celle des pays précités à en faire de même.

¹⁰ JAGANNATH P. Panda (2021), *Beijing Boosts its Position as a "Himalayan Hegemon" through Hydropower*, The JamesTown Foundation, June 7.

Mais cette stratégie peut aussi se traduire par un retournement paradoxal¹¹. En effet, cette stratégie chinoise d'adaptation au changement climatique par la militarisation de la « grande fonte » himalayenne peut aussi amener les pays situés en aval à faire de la Chine, leur ennemi commun. Il en résultera une hausse des tensions et des violences dans cette région, ainsi qu'une perte d'influence de la Chine, à laquelle s'ajouteront des risques pesant sur son hégémonie hydraulique et, par là même, sur son propre avenir.

Incertitudes stratégiques et changement permanent

Les modalités d'adaptation géopolitique et stratégique de la Russie et de la Chine s'inscrivent dans une façon de penser les évolutions planétaires comme des contraintes auxquelles ces entités politiques considérables peuvent encore répondre, tout en demeurant dominantes au niveau international.

Or, la dégradation généralisée des conditions de vie dans les années à venir va entraîner des tentatives d'adaptation collectives via la migration. Ces nouveaux flux de population, qui risquent de concerner des centaines de millions de personnes tout au long des quatre-vingt prochaines années, seront enclins à se diriger vers les pays étant parvenus à un certain niveau d'adaptation au changement climatique¹².

Leur réponse à l'arrivée de ces flux massifs de population sera l'un des enjeux du maintien de leur cohésion, et donc des capacités d'adaptation nationales et méta-nationales, sur une planète dont des zones entières sont en train de devenir inhabitables¹³.

¹¹ LUTTWAK Edward N. (2001), *Strategy: The Logic of War and Peace*, Cambridge, MA: Harvard University Press, 2nd édition.

¹² GIEC, sixième rapport d'évaluation, 9 août 2021, <https://www.ipcc.ch/languages-2/francais/>

¹³ WALLACE WELLS David (2019), *The Uninhabitable Earth, Life after Warming*, New-York, Tim Duggan Books, <https://www.penguinrandomhouse.com/books/586541/the-uninhabitable-earth-by-david-wallace-wells/>

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

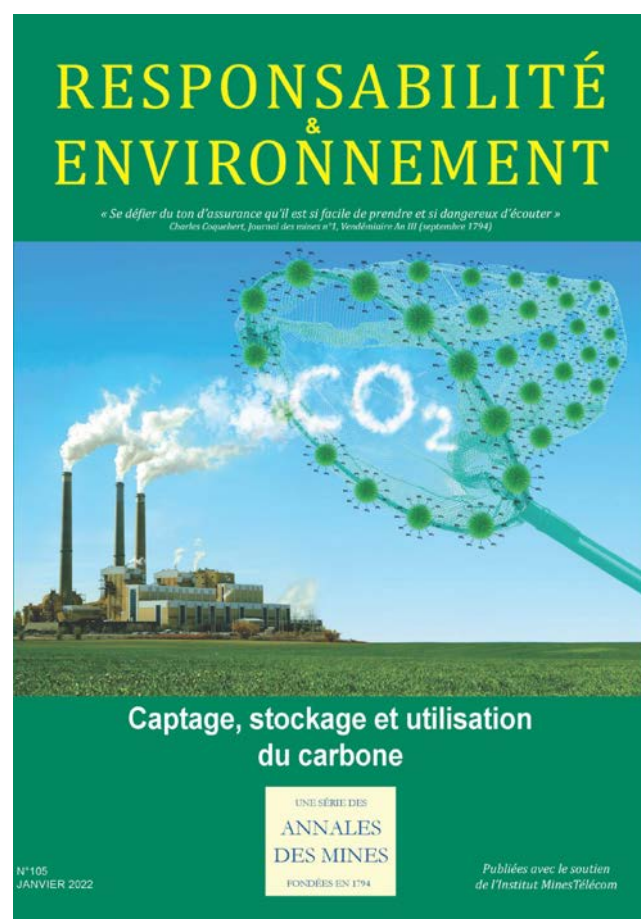
Captage, stockage et utilisation du carbone

Préface : Enfin !

Claude MANDIL

Introduction

Dominique AUVERLOT et Richard LAVERGNE



Janvier 2022

L'atteinte des objectifs climatiques (1,5°C) au niveau mondial serait socialement et économiquement inacceptable sans recours au CCUS et aux autres procédés de GGR (Greenhouse Gas Removal)

Net zero commitments drive global momentum for CCUS

Mary BURCE WARLICK

L'état de l'art du CCS et du CCUS description : coût et contraintes

Pierre-Franck CHEVET, François KALAYDJIAN et Guy MAISONNIER

Panorama mondial des potentiels de stockage géologique du CO₂

Isabelle CZERNICHOWSKI-LAURIOL et Christophe POINSSOT

The development of UK CCUS strategy and current plans for large-scale deployment of this technology

Jon GIBBINS and Mathieu LUCQUIAUD

État de l'art du CCUS et autres procédés de GGR

CCUS et Charbon – Existe-t-il encore des opportunités de développement pour les centrales au charbon ?

Sylvie CORNOT-GANDOLPHE

Les projets de CCS en cours chez TotalEnergies

David NEVICATO

ExxonMobil: Carbon capture is critical to attaining society's emission-reduction goals

Joe BLOMMAERT

Les opportunités offertes par le CCUS pour décarboner l'industrie française

Benoît LEGAIT

Le potentiel du stockage géologique du CO₂ par minéralisation

Sylvain DELERCE et Éric H. OELKERS

Pas de décarbonation du secteur aérien sans la capture et le stockage du CO₂

Dominique VIGNON

L'acceptabilité sociale des technologies de captage, de transport, d'utilisation et de stockage du CO₂ : un travail d'ajustement réciproque du projet technique et de ses parties prenantes

Jonas PIGEON

Le développement des émissions négatives

Le stockage du carbone dans les sols

Claire CHENU, Jean-Luc CHOTTE et Paul LUU

Direct Air Capture (DAC) in Germany: resource implications of a possible rollout in 2045

Simon BLOCK and Dr. Peter VIEBAHN

Géo-ingénierie – Perspectives, limites et risques

Ilarion PAVEL

Géo-ingénierie et gestion du rayonnement solaire

Anni MÄÄTTÄNEN

Le dossier a été coordonné par **Dominique AUVERLOT et Richard LAVERGNE**

Ce numéro peut être consulté et téléchargé gratuitement sur notre site

<http://www.annales.org>

Le Carbone Capture and Storage (CCS) : un véritable atout, des arbitrages nécessaires

Par Maxime EFOUI-HESS

The Shift Project

Exposée à une inévitable double contrainte carbone – décarboner l'intégralité de ses activités à hauteur de 80 % d'ici à 2050 et s'affranchir presque intégralement des intrants fossiles –, la France ne pourra faire l'économie d'une transformation. Le plan de transformation de l'économie française de The Shift Project permet de projeter la France sur des trajectoires à la fois cohérentes sur le plan physique (énergie, matières) et sur celui de l'emploi, ainsi qu'au regard des enjeux.

Parmi les solutions technologiques mobilisables, on trouve le captage et le stockage du carbone. Innovation la plus à même de capter les émissions fatales de l'industrie, elle est un atout véritable, dont les limites techniques, économiques et sociétales nous forceront à l'utiliser là où ce sera le plus efficient. Son potentiel, identifié, doit ainsi être mobilisé prioritairement pour décarboner l'industrie lourde.

Seule la combinaison des trois types de leviers à disposition – progrès continu, technologies de rupture et sobriété – permettra d'assurer une transformation à la hauteur des objectifs nationaux de décarbonation.

Le plan de transformation de l'économie française

Le plan de transformation de l'économie française (PTEF) de The Shift Project vise à proposer des solutions pragmatiques pour répondre à la double contrainte carbone – réduire les émissions liées à nos activités et nous affranchir presque totalement des énergies fossiles –, secteur par secteur, en favorisant la résilience et l'emploi.

L'élaboration du PTEF repose sur quatre piliers :

- adopter une approche globale, systémique et cohérente du point de vue des lois de la physique et de la technique, et des flux économiques ;
- s'intéresser aux vraies ressources rares : les ressources physiques et les compétences, l'emploi étant au cœur du dispositif ;
- faire des propositions pragmatiques, opérables dès à présent, de façon à ouvrir un chemin de décarbonation réaliste et cohérent au sein d'une transformation de long terme qui impose un rythme de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), qui soit, dès aujourd'hui, d'environ 5 % par an en moyenne ;
- ne pas construire une trajectoire qui reposerait sur le pari de la croissance économique comme phénomène exogène, ou sur des évolutions technologiques supposées advenir mais non encore éprouvées.

Davantage qu'un scénario, le PTEF est une méthodologie de traitement de la transition carbone-énergie, combinant deux approches :

- l'approche sectorielle, laquelle s'appuie sur les leviers de décarbonation identifiés pour chaque secteur (mobilité quotidienne, mobilité longue distance, logement, santé, culture, administration publique, fret, industrie), ainsi que sur des réalités opérationnelles, en matière d'activité et d'emploi ;
- et l'approche transverse, qui permet de donner une vision globale de l'économie et de sa transformation, au travers de trois angles de lecture : l'emploi, les flux d'énergie et les flux de matières. En croisant les transformations proposées par chaque secteur, ce travail assure la cohérence physique du PTEF et sur le plan des emplois. Les ressources utilisées par certains secteurs ne peuvent l'être par d'autres (par exemple, la biomasse ou bien la disponibilité en hydrogène, laquelle notamment est limitée par les capacités du système électrique). Transformer l'économie, ce n'est donc pas se contenter d'aligner les leviers disponibles pour chaque activité, mais bien de comprendre où seront les arbitrages à faire : quel degré de transformation pour quelle activité ? Quel choix faire sur le plan de notre dépendance aux flux physiques nécessaires à la transformation ? Etc. C'est tout cela que permet l'approche du PTEF : lister les questions-clés à traiter à l'échelle collective pour choisir une direction à la fois viable dans ses objectifs et sa faisabilité.

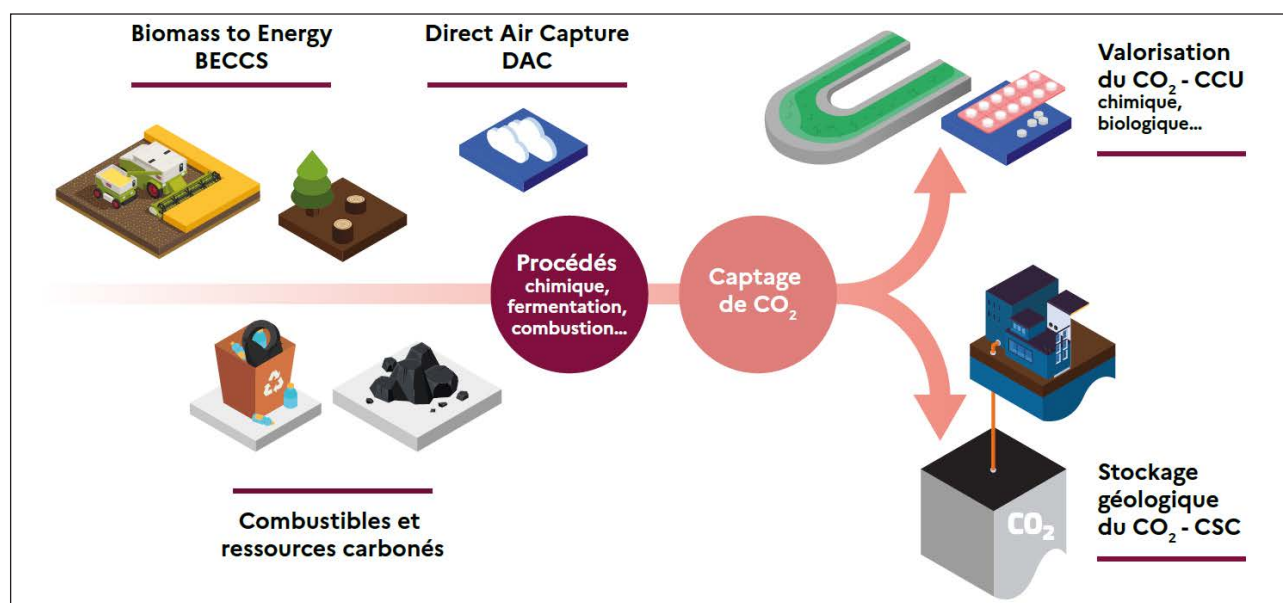


Figure 1 : Les différentes technologies associées au CCS : CCU, BECCS et DAC – Source : ADEME, 2020 [1].

Le CCS : un atout essentiel pour la décarbonation de l'industrie

Une technologie mûre, mais au potentiel de déploiement limité

Capter le carbone est l'une des ruptures technologiques régulièrement citées par les feuilles de route de décarbonation de cette dernière décennie. Son principe est simple : il consiste en substance à emprisonner les molécules de dioxyde de carbone présentes dans les effluents gazeux issus d'une installation industrielle (une centrale thermique au charbon, au fuel ou au gaz, une aciérie, une cimenterie, une raffinerie...), pour les faire ensuite migrer soit vers un site de stockage, soit vers un site de traitement pour être réutilisés pour d'autres usages.

Les technologies aujourd'hui à l'étude se répartissent entre trois processus de captation du carbone, et deux types de traitement.

Les processus de captation du dioxyde de carbone

- le carbone peut être issu de la combustion d'énergies fossiles ou de procédés de production (chimie de l'ammoniac, production du clinker, etc.), dont les fumées sont captées en sortie d'usine, avant d'être traitées pour en extraire le CO₂¹ ;

¹ Dans les procédés de précombustion, la combustion est partielle et réalisée avec de l'eau, ce qui conduit notamment à la synthèse de l'hydrogène et du CO₂, qui doivent ensuite être séparés pour être stockés ; c'est l'hydrogène dit « bleu ».

Les procédés de postcombustion consistent à capturer le CO₂ contenu dans les effluents gazeux d'installations industrielles. Par ailleurs, les procédés d'oxycombustion utilisent comme comburant non pas l'air mais l'oxygène, lequel doit donc être préalablement extrait de l'air (par cryogénie, notamment), de manière à ce que les gaz de combustion contiennent uniquement du CO₂ et de l'eau. Il suffit donc de les déshydrater avant leur transport et leur stockage.

Enfin, il existe des technologies de capture spécifiques à certains procédés de production (chimie de l'ammoniac, production du clinker, etc.).

- les procédés dits « Biomass to Energy with CCS (BECCS) » permettent de capter le carbone dit « biogénique », issu des fumées de combustion de sites de production utilisant uniquement la biomasse comme combustible. Cette méthode permet d'utiliser la croissance végétale comme mécanisme de captation du carbone de l'air ambiant et de s'en servir comme puits de carbone ;
- le « Direct Air Capture (DAC) » ambitionne, quant à lui, de capter directement le dioxyde de carbone dans l'air ambiant à l'aide d'installations industrielles dédiées.

Les deux types de traitement

- le CO₂, une fois capté, peut être transporté, puis stocké de façon permanente dans des structures géologiques profondes, comme des aquifères ou des réservoirs de pétrole ou gaz déplétés. C'est la technologie dite CCS ;
- le CO₂ peut sinon être réutilisé dans des processus industriels de valorisation du carbone ou d'utilisation de celui-ci, directement ou après transformation chimique afin de produire de nouvelles matières ou des combustibles de synthèse : c'est le CCU (Carbon Capture and Utilisation).

Dans le PTEF, les technologies mobilisées relèvent uniquement du captage du carbone issu des fumées d'usines recourant à des combustibles fossiles et de son stockage géologique. Le captage du carbone n'a pas vocation à servir de puits de carbone à grande échelle et à permettre d'atteindre la neutralité en 2050 en retirant du CO₂ aujourd'hui présent dans l'atmosphère, mais plutôt à alléger la part de réduction des émissions de l'industrie devant reposer sur la minoration des volumes de production.

Les procédés reposant sur la soustraction de carbone de l'atmosphère (BECCS et DAC) affichent des probabilités de viabilité différentes :

- le DAC reste aujourd'hui un pari technologique très incertain : certaines de ses technologies essentielles n'atteignent pas aujourd'hui le degré de maturité nécessaire pour être déployées à l'échelle industrielle au cours des cinq à trente prochaines années (par exemple, l'efficacité insuffisante des filtres nécessaires pour capter un volume suffisant de carbone dans l'air, ou bien encore le manque actuel de données sur l'énergie nécessaires à la production et l'opération de ces systèmes) [1] ;
- les technologies liées au BECCS sont majoritairement matures : néanmoins, elles s'appuient sur une utilisation particulière de la biomasse, dont les conditions de viabilité au sein d'une économie qui se transforme restent à instruire. La biomasse et les surfaces nécessaires à la produire font partie des ressources sur lesquelles il existe des tensions grandissantes dans le cadre d'un report vers les énergies et matériaux décarbonés (comme le bois pour la construction ou la biomasse pour la production d'énergie²).

Selon le Global CCS Institute, les projets de CCS aujourd'hui en construction ou faisant l'objet d'un développement avancé représentent, au niveau mondial, une capacité de stockage totale de près de 40 MtCO₂/an [2]. Selon l'Ademe, près d'une vingtaine de projets de ce type sont véritablement déployés à l'échelle industrielle, représentant une capacité de stockage totale mondiale de 23 MtCO₂/an.

Le CCS est donc une technologie présentant un degré de maturité suffisamment avancé pour faire partie de l'équation de la décarbonation. Mais elle ne peut pas être considérée aujourd'hui comme une solution généralisable.

Il s'agit d'une technologie techniquement mûre, mais très intense en capitaux et sur laquelle pèsent de nombreuses incertitudes sur ses capacités d'un passage à l'échelle³, d'où la nécessité de trancher au préalable de nombreuses questions d'ordre stratégique :

- quels cadres et organisation des activités de CCS retenir sur le plan opérationnel (localisation des

zones de stockage, déploiement des infrastructures) comme sur le plan juridique (responsabilité du stockage, des fuites éventuelles, etc.) ?

- quels secteurs de l'économie doivent être prioritaires dans l'allocation des possibilités de stockage, si les capacités en sont limitées ?

Le CCU, quant à lui, n'est pas mobilisé dans le PTEF : les conventions d'allocation des émissions peuvent en effet cacher une réduction arithmétique mais non physique de ces dernières, ce qui réclame de disposer d'une documentation plus poussée.

Le CCS : un levier à utiliser en priorité pour décarboner l'industrie

Le potentiel de captation et de stockage des émissions carbonées en France est évalué par l'Ademe [1], en identifiant les sources de gaz à effet de serre répondant aux critères suivants :

- les sources doivent être fixes. En effet, les sources mobiles (un véhicule, par exemple) ne peuvent pas être raccordées à l'infrastructure nécessaire pour le traitement, le transport et le stockage ;
- la concentration des fumées des sites doit être suffisante pour permettre le captage des molécules de CO₂ par les solvants⁴. Et la quantité de carbone émis par l'installation doit être supérieure à 100 ktCO₂/an pour assurer la viabilité technico-économique du déploiement ;
- la conformation et la localisation des sources doivent être compatibles avec les contraintes de mise en place des dispositifs de captage et la faisabilité de l'implantation des infrastructures de transport au vu de l'emplacement des sites de stockage.

Dans une économie française souhaitant s'engager dans une stratégie visant à rendre sa production d'électricité indépendante des énergies fossiles, les seules installations correspondant aux critères précités sont celles de l'industrie lourde. Le potentiel évalué par l'Ademe de captation des émissions de l'industrie en France s'élève à 24 MtCO₂/an.

Parmi les sites industriels les plus concernés, les installations relevant des filières de production de ciment, d'acier et d'ammoniac sont particulièrement éligibles au déploiement du CCS⁵ :

- leurs procédés sont en effet très intenses en carbone. Il s'agit en outre d'installations présentes dans les grandes régions porteuses de cette technologie ou connectées à des sites de stockage géologique viables (le pourtour nord du territoire français avec notamment la proximité des structures géologiques présentes dans les eaux voisines de la mer du Nord – en Norvège, au Royaume-Uni ou aux Pays-Bas –,

² Ces dynamiques de croissance du recours au bois dans la construction sont décrites dans les travaux portant sur la filière Ciment-Béton et au sein du rapport de The Shift Project intitulé « Habiter dans une société bas-carbone – Dans le cadre du Plan de transformation de l'économie française », publié en octobre 2021.

³ Le déploiement d'infrastructures de captage et de stockage réclame des investissements financiers et matériels très conséquents : production et opération des dispositifs de captage en sortie des cheminées, déploiement d'une infrastructure de transport et de stockage d'envergure comparable à celle de certaines installations pétrolières, nécessité d'assurer la surveillance des sites de séquestration pour limiter les risques de catastrophes naturelles liés. Les effets d'échelle sont, de plus, complexes à atteindre dans la phase de captage, notamment en ce qui concerne l'intégration des dispositifs de captage, laquelle nécessite une adaptation systématique aux spécificités du site industriel, des caractéristiques de ses cheminées et de la nature de ses évacuations (ADEME, 2020) [1]. D'où la pertinence d'utiliser à court terme les infrastructures existantes pour le stockage, notamment en mer du Nord ou en région Aquitaine.

⁴ La technologie de postcombustion par captage aux amines est aujourd'hui la plus mature et est largement déployée.

⁵ Les installations de production d'électricité au gaz, charbon ou pétrole ne sont pas listées ici, en ce qu'elles ne font pas partie d'un mix électrique français transformé dans une logique d'indépendance vis-à-vis des énergies fossiles en tant que telles.

et, dans une moindre mesure, la région Aquitaine et le quart sud-est de la France avec les aquifères salins profonds que l'on trouve dans le sous-sol de ces régions) ;

- leurs émissions carbonées sont des produits indésirables issus directement des procédés de production utilisés dans les secteurs considérés. Ces émissions resteront donc incompressibles même dans une société transformée, puisque celle-ci continuera de recourir au ciment, à l'acier et aux produits issus de la chimie.

Le CCS est une technologie puissante, mais complexe à mettre en œuvre, du fait qu'elle combine des innovations fortes dans chacune des phases de son *process* (captage, transport, stockage), qu'elles soient d'ordre technique (chimie des amines, captage par le froid, gestion et sécurité des sites de stockage, etc.), réglementaire (droit international pour le stockage *offshore*, etc.) ou sociétal (acceptabilité du stockage sur le territoire concerné, implantation de lourdes infrastructures, etc.).

L'enjeu est donc de faire de cette technologie l'atout majeur qu'elle peut être : et ce, en rendant son application possible à la bonne échelle (grâce à un pilotage de son déploiement, à l'évolution des sites industriels, à la mutualisation des infrastructures) et en l'utilisant prioritairement sur les industries dont les émissions de procédés sont très importantes.

Le PTEF déploie donc cette technologie de manière réaliste, mais tout en étant ambitieux, en privilégiant son utilisation pour les cimenteries, la production d'ammoniac et la sidérurgie, avec des capacités de captage estimées respectivement à :

- 1 MtCO₂/an pour les sites de production de l'industrie cimentière ;
- 2 MtCO₂/an pour les sites de production de l'industrie chimique ;
- 4 MtCO₂/an pour ceux de l'industrie sidérurgique.

Cette capacité totale de 7 MtCO₂/an, construite sur la base des potentiels identifiés par l'Ademe et des considérations de faisabilité développées dans nos analyses sectorielles, correspond à l'ordre de grandeur du potentiel déterminé pour cette technologie dans le cadre de la SNBC (environ 5 MtCO₂/an) [3].

Rendre possibles les ruptures et préparer notre industrie à la sobriété

L'industrie représente près d'un cinquième des émissions territoriales françaises, soit bien plus que son poids économique. La chimie, la métallurgie (principalement la sidérurgie, c'est-à-dire la production d'acier) et l'industrie des matériaux de construction (principalement le ciment) représentent à elles seules les trois-quarts des émissions du secteur de l'industrie [4].

À la fois colonne vertébrale et secteur à part entière de l'économie, l'industrie est confrontée à un double enjeu. Elle doit permettre aux autres secteurs de se transfor-

mer – en produisant les biens et infrastructures dont ils ont besoin pour décarboner leurs activités –, tout en s'assurant que sa propre production soit elle-même décarbonée et presque totalement indépendante des intrants fossiles.

Seule une combinaison des trois familles de leviers précitées permettra d'atteindre l'objectif de réduction de 80 % des émissions carbonées du secteur de l'industrie en 2050. Ces leviers sont donc :

- le progrès continu (efficacité énergétique, changement de combustibles pour les fours, recyclage mécanique, etc.), qui doit permettre d'assurer 40 % du chemin total de la décarbonation du secteur ;
- la mobilisation des leviers de rupture technologique (recours à l'hydrogène produit par électrolyse, recours au CCS, recyclage chimique, etc.), qui permettront eux aussi d'assurer 40 % du chemin total de la décarbonation du secteur ;
- et, enfin, les leviers de sobriété (sobriété en ce qui concerne les emballages plastiques, les constructions neuves, etc.), assurant les 20 % restants.

S'agissant des ruptures technologiques identifiées, celles-ci ne se produiront que si certaines initiatives politiques se concrétisent véritablement. Il est en effet nécessaire de construire le cadre réglementaire et stratégique grâce auquel ces innovations pourront advenir à grande échelle. Il s'agit :

- d'orienter prioritairement la production d'hydrogène vers l'industrie lourde, plus précisément la sidérurgie et l'industrie des engrais, et de dimensionner le système électrique pour qu'il soit capable d'absorber la nouvelle demande qui découlera de cette réorientation ;
- de déployer des normes performantielles ambitieuses et ciblées ;
- de mettre en place des outils de gouvernance aux niveaux national et européen, qui permettent de ne pas saborder l'industrie française devenue décarbonée, face à des industries extérieures fortement émissives mais bon marché.

Bien que la transformation de l'industrie envisagée dans le PTEF soit parfois plus ambitieuse que celle découlant des feuilles de route sectorielles sur la mobilisation des leviers technologiques, elle ne doit pas faire oublier la nécessaire adaptation de notre industrie à une sobriété inévitable à un double titre. Inévitable en ce qu'elle découle des contraintes qui s'imposent aux autres secteurs, situés en aval, qui ne pourront atteindre leurs propres objectifs qu'en recourant à une part de cette sobriété. Inévitable aussi en ce qu'elle est indispensable à l'industrie elle-même pour qu'elle puisse se placer sur la bonne trajectoire au regard de sa décarbonation.

De plus, **les technologies de rupture constituent des opportunités à pousser, mais elles restent un pari**. Les risques d'échec étant bien plus forts pour les technologies de rupture que pour les leviers de progrès continu, il est essentiel de comprendre qu'il doit être

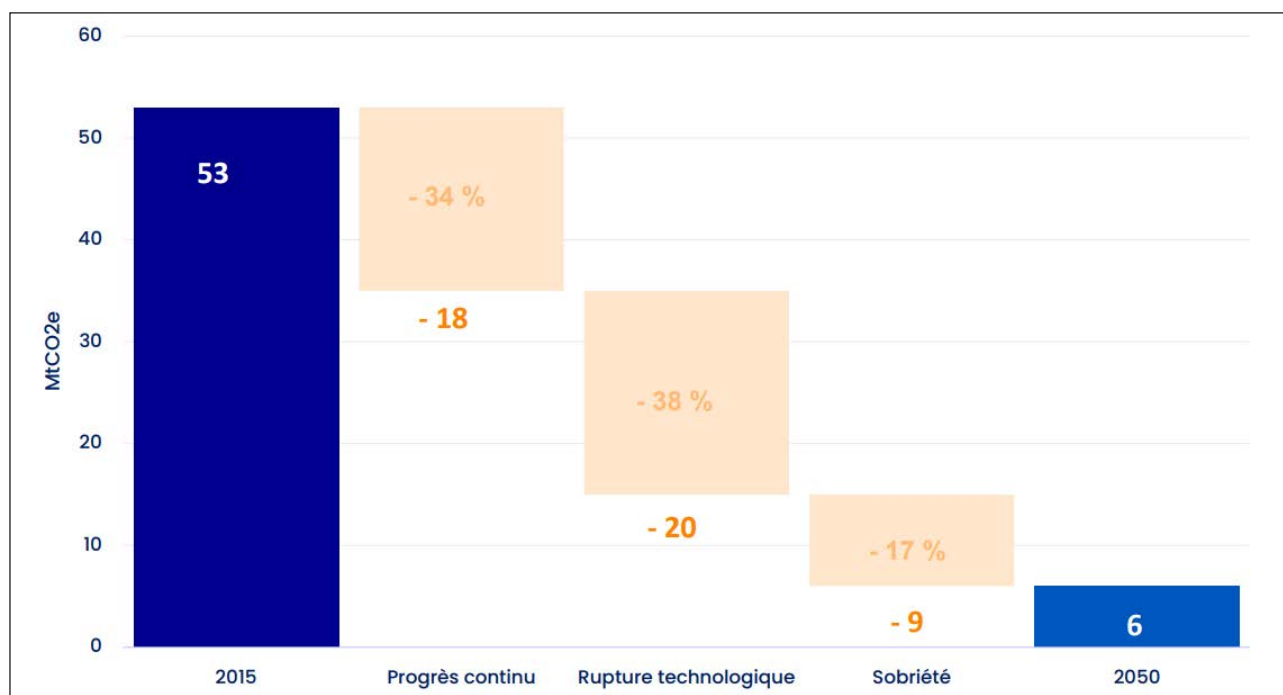


Figure 2 : Évolution entre 2015 et 2050 des émissions GES du secteur de l'industrie lourde en France, en MtCO_{2e} – Source : calculs de The Shift Project réalisés dans le cadre du PTEF.

envisagé de recourir à une sobriété plus intense si le déploiement des premières échoue dans les années à venir. Pousser leur développement devra donc s'accompagner de celui d'outils de suivi, devant permettre de détecter suffisamment tôt un écart trop grand dans leur mobilisation par rapport à la trajectoire de décarbonation. Ceci étant, un tel déploiement ne devra en rien nous affranchir de préparer l'adaptation de notre industrie à une plus grande sobriété.

changement-climatique-et-energie/69-avis-de-l-ademe-captage-et-stockage-geologique-de-co2-csc-en-france.html

[2] GLOBAL CCS INSTITUTE (2021), "Global status of CCS 2021 – CCS accelerating to net zero", <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>

[3] MTES (2020), « Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) », <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>

[4] CITEPA (2021), « Données d'émissions et rapports d'inventaire », <https://www.citepa.org/fr/telechargements/>

Bibliographie

[1] ADEME (2020), « Avis de l'Ademe – Captage et stockage géologique du CO₂ (CSC) en France », <https://librairie.ademe.fr/>

Adaptation to climate change

Foreword

Barbara Pompili, Minister of Ecology

Introduction

Hervé Le Treut, IPSL, and **Michel Pascal**, Conseil général de l'économie

Preamble

Adaptation to climate change: better defining the issues to start the debate

Ronan Dantec, Senator for Loire-Atlantique and member of the National Council for Ecological Transition (CNTE)

What will be the climate in 2050 and its consequences?

The main findings of the 6th IPCC Group I report

David Salas y Mélia, Research climatologist at the Centre national de recherches météorologiques (Météo-France and Centre national de la recherche scientifique)

The IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Working Group I published its 6th report on the physical science basis of climate change in August 2021. This report reaffirms that the human origin of climate change observed since the second half of the 19th century is unequivocal, whether it is the observed global warming (+1.1°C), the retreat of snow and ice, ocean acidification or sea level rise. One of the major advances of the report is to highlight the human influence on the intensity and frequency of extreme phenomena such as heat waves or heavy rainfall. The observed changes in the climate system will continue – in particular, it is certain that the global temperature will reach the 1.5°C threshold within 20 years – but they can still be contained by taking strong, rapid and sustained action to reduce CO₂ emissions.

Global Climate Change Impacts: Key Findings of the Latest IPCC Working Group II Report

Éric Brun and **Lisa Bostvironnois**, ONERC

In this article, we present the main impacts of climate change on natural and human systems, on a global scale. We rely on the latest report of the IPCC WG2 – a document of several thousand pages – and intend to give the reader some keys to better understand the results in the areas that interest him.

Overview in Europe and France of the present and future effects of climate change

Jérôme Duvernoy, Head of the Climate Change Adaptation Unit at the Ministry of Ecological Transition

In this article, we present the main impacts of climate change at the European and French scales, already observed and projected on the basis of IPCC reports, a recent report by the European Environment Agency, as well as ONERC thematic reports.

What climate in France in 2050 and 2100?

Virginie Schwarz, President and CEO of Météo-France, and **Jean-Michel Soubeyroux**, Deputy Scientific Director of the Climatology and Climate Services Division of Météo-France

France is not spared the extent of climate change that has been observed and that will occur in the future. A new set of climate projections "DRIAS2020", made available by Météo-France, details the climate changes described in the work of the IPCC for metropolitan France.

Up to the middle of the century, the evolution is not very dependent on the greenhouse gas emission scenarios, with an average warming of +1.7°C but also the multiplication of extreme events such as heat waves or soil droughts.

By 2100, however, the evolution will depend heavily on greenhouse gas emissions, with a totally disrupted climatology for our country and major impacts on all our activities if emissions are not significantly reduced.

These projections are a reminder of the urgency to act to reduce greenhouse gas emissions. They are also the basis for the development by Météo-France of climate services that provide the various sectors of activity with decision-making aids for adapting to changes that are already inevitable.

The effects of global warming are already visible

Rethinking water in an era of climate change

Denis Salles, ETTIS Inrae

"Preparing to live in a different world" is what climate change seems to require from us. The refusal to give in to the fatalism of collapsology, as well as to the disillusionment of thirty years of promises of sustainable development, condemns us to optimism. "Water for quality of life" rather than "water for use" is the current shift from the extractivist reference framework of water, which has prevailed since the industrial era, to a conception of water as a "matrix" of life. This contribution explores the cognitive dimensions, the conflicts of interest, the worldviews as well as the anticipation science approaches (scenarios,

trajectories) that are able to accelerate the social-ecological transition towards desirable and just water futures.

Climate change in the mountains: impacts, risks and adaptation

Samuel Morin, University of Toulouse, Univ. Grenoble Alpes, Météo-France, CNRS, Centre National de Recherches Météorologiques, Toulouse and Grenoble

Mountain regions concentrate characteristics that make the effects of climate change particularly visible. They are therefore sentinels of ongoing and future changes and impacts. They have natural and socio-economic features that distinguish them, particularly in terms of water resources, biodiversity, agricultural and cultural heritage, including the specific high mountains environment, which supports emblematic leisure and tourism activities. They are also characterized by many natural gravitational hazards that complicate and increase the cost of their socio-economic development. Climate change affects almost all of these interconnected issues, modifies their characteristics, and undermines traditional management methods of these features and intrinsic difficulties. Interdisciplinary knowledge and tools are being developed to take this into account in territorial development strategies.

Health impacts of climate change already visible: the example of heat waves

Lucie Adélaïde, Olivier Chanel and Mathilde Pascal, Aix-Marseille School of Economics, Santé publique France

Climate change, loss of biodiversity and environmental degradation affect the public health. In particular, the increase and persistence of high temperature spells could put a large part of the population at serious risk, and drastically limit human activity. Yet, heat waves are underrepresented in analyses of extreme weather events, and particularly in economic assessments. This lack of study, combined with the low risk perception of the population, limits the will to implement adaptation measures even though the impacts are avoidable. This article presents the evolution of the global economic impact of the health effects of heat waves in France between 1974 and 2020.

The effects of climate change: what adaptation for coastal territories?

Patrick Bazin, Director of heritage management at the Conservatoire du littoral

The coastline is a moving environment subject to the considerable forces of the sea, wind and coastal rivers. Over the centuries, Man has sought to control these natural dynamics and to fix the shores. Today, the logic is reversed: with the gradual rise in sea level, coastal management can no longer rely entirely on the rigid defense of the coastline.

Faced with uncertainties, a new engineering of the management of coastal territories is emerging, which must integrate different disciplines in terms of exper-

tise, different strategies over time and reinvented governance.

The considerations developed in this article come mainly from the lessons learned from the Adapto project conducted by the Conservatoire du littoral since 2018. They concern above all the less urbanized coastal sectors. Some of them can be applied to more developed and inhabited sectors, but the stakes involved are not comparable and transposition is therefore not self-evident.

Resilience of electrical systems to climate change

Alain Burtin and Sylvie Parey, EDF R&D

The resilience of electrical systems to weather and climate risks is a fundamental issue for the security of electricity supply and for ensuring a quality supply. Current electrical systems have been developed on the basis of climatic reference systems derived from historical observation of weather and climate phenomena. The current climate change leads us to reexamine the relevance of our reference systems in the light of current climate changes and future climate projections made within the framework of the IPCC work. In this article, we discuss the example of the French power system based on studies conducted at EDF R&D in order to characterize climate change and its potential impacts on the power system, before looking at the adaptation process undertaken by the EDF Group.

Climate change and its economic consequences

Laurent Montador, Deputy Director General of the Caisse centrale de réassurance (CCR)

While the successive IPCC reports consolidate the projections of climate change for the year 2050, the modeling of the impacts of climate change on extreme weather events is becoming more precise and operational. The models developed by the CCR for more than 15 years provide a territorial vision of the potential evolution of the cost of natural disasters in France. This perspective of worrying evolution for the safety of people as well as for the economic resilience of the country will most probably put under tension a natural disaster compensation system, which is based on national solidarity and is unique in Europe. Faced with these developments, there is hardly any other path than that of adaptation, revitalization of prevention practices and reinforcement of the effectiveness of public policies in this area.

Adapting and Mitigating: An Inclusive Systemic Approach

Mitigation and adaptation: a race against time

Hervé Le Treut, Professor at the Sorbonne University and at the École Polytechnique

In a few years or decades, adaptation to climate change has become an essential necessity in the face of an

ever-growing constant, that of a very insufficient control of greenhouse gas emissions, which keeps us further and further away from stabilization scenarios proposed by the Paris agreements. The modalities of this adaptation are therefore themselves very constrained. Firstly because it is of course not a question of competing with mitigation actions, but of determining what makes the common denominator of these two approaches. Also because the scale of the territories, which is often that of adaptation, must take into account a complex reality which is also that of the living, of biodiversity and of humans, all of which we have a duty to protect.

European and French strategies for adaptation to climate change

Jérôme Duvernoy, Marie Carrega and Sarah Voirin, National Observatory on the Effects of Global Warming

In this article, we present a brief history of climate change adaptation policies in the European Union and France, followed by an overview of current policies. An overview of the climate policies currently being developed also shows the link between mitigation and adaptation policies.

The links between adaptation and mitigation: when adaptation worsens climate change

Vincent Viguié, Researcher at CIRED (École des Ponts ParisTech)

Although, at first glance, "adaptation" to climate change and "mitigation" of climate change are two relatively distinct subjects, in practice they are not independent. Indeed, they often mobilize the same public policy tools, and constrain each other. In particular, certain adaptation choices can lead to massive energy consumption (widespread use of air conditioning, desalination of sea water, etc.). This runs the risk of a vicious circle in which climate change itself contributes to the increase in emissions. Favoring the deployment of other strategies, even if this is not always easy, is therefore essential. Beyond mitigation, similar questions arise with other social or environmental issues, and avoiding the risk of unintended adverse consequences associated with certain adaptation choices is one of the crucial issues of the coming years.

Adaptation to climate change: first of all, intelligence put into the projects

Morgane Nicol and Vivian Dépoues, Institute for climate economics (I4CE)

While the benefits of anticipation are widely demonstrated, the level of adaptation to climate change in France remains low. This observation calls for a detailed analysis of the barriers encountered by actors seeking to fully address the issue. Based on case studies conducted as part of the Finadapter research project, this article looks at some of these barriers. It focuses on two of these cases located in an urban context: the implementation of the adaptation plan of the European Metropolis

of Lille, and an urban development project in a flood zone in the Nantes metropolis. These cases illustrate the nature of the responses to be deployed, which, far from being solely ready-made technical solutions, most often take the form of combinations of different types of measures, always specific to a given context. The analysis of these situations tends to demonstrate that adapting a territory to climate change does not systematically generate significant additional costs but requires human resources, time and expertise to question how to conduct projects and policies.

What prospects for water and agriculture by 2050 in the context of climate change?

Hugues Ayphassorho, member of the General Council for the Environment and Sustainable Development (CGEDD), **Michel Sallenave**, former member of the General Council for Agriculture, Food and Rural Areas (CGAAER), **Nathalie Bertrand**, member of the CGEDD, **François Mitteault**, former member of the CGEDD, and **Dominique Rollin**, former member of the CGAAER

The IPCC's projections of future tensions over access to and sharing of water raise questions about the ways and means of adapting agriculture between now and 2050. The Ministry of Ecological Transition and Solidarity and the Ministry of Agriculture and Food have taken up this issue, entrusting the CGAAER and the CGEDD in 2019 with a mission on the evolutionary trajectories of agriculture over a thirty-year horizon.

On the basis of a rich bibliography and extensive fieldwork, it has been shown that the response to the climate crisis requires both a change in the agricultural model, which is more water-efficient and protects the soil, and, wherever possible, a strengthening of the water resource used for irrigation, while respecting the renewal of the resource and the good condition of the environment. The mission thus proposed an ambitious deployment of agro-ecology and the transition to "resilient" irrigation, which is more water-efficient. To this end, it formulated seven main recommendations in a draft roadmap.

Biodiversity and climate: nature-based approaches

Denis Couvet, President of the FRB (Foundation for Research on Biodiversity), and **Hélène Soubelet**, Director of the FRB

Better management of ecosystems could contribute to significant climate change mitigation. To achieve this, a certain number of conditions must be met: preserve and restore the biological diversity of these ecosystems, including that of animal and microbial communities; facilitate the adaptation of these ecosystems to global changes by maintaining corridors and reducing disturbances; and take into account the diversity of territories by integrating the associated knowledge and values.

Climate extremes: perceptions and social and political issues

Solange Martin, Sociologist at the Secretariat of the High Council for the Climate

While climate change is getting real in France and worldwide, environmental concern is still a forefront issue, even after two years of Covid-19 pandemic. Especially tangible, destructive and frightening, extreme climatic events strengthen the idea of climate emergency in the public opinion. As they are to occur more frequently and with an increased intensity, the extreme climatic events make necessary to know what new environmental risks produce on individuals and societies. Human and social sciences, and economics enlighten the multiples stakes of this question. Increased eco-anxiety, tensions and conflicts underline the necessity to face this situation in a collective way. The fact that everybody has to "do its part" should not hide the fact that climate emergency is also and even most of all a political and social one.

Geopolitics of climate change adaptation: the survival and power of nations

Jean-Michel Valantin, Think tank The Red (Team) Analysis Society

Adaptation to climate change is a geopolitical issue, as this adaptation – or maladaptation – is becoming the driving force behind the international distribution of power.

In order to study the reality of this evolution, as well as the interdependencies that are emerging, we propose in this article to study the way Russia and China are entering this process.

This case study also allows us to highlight the military dimension of this issue, where geophysics and geopolitics intermingle to recompose the modalities of power.

Miscellany

Carbon Capture and Storage (CCS): a real asset, but necessary trade-offs

Maxime Efoui-Hess, The Shift Project

Faced with an inevitable double carbon constraint – decarbonizing all of its activities by 80% by 2050 and becoming almost entirely free of fossil fuels – France will have to transform itself. The Shift Project's Plan for Transforming the French Economy allows us to project France on trajectories that are both consistent in physical terms (energy, materials) and in terms of employment, as well as in terms of the stakes.

Among the technological solutions that can be mobilized, we find carbon capture and storage. This innovation is the most capable of capturing fatal emissions from industry and is a real asset, but its technical, economic and societal limits will force us to use it where it is most efficient. Its identified potential must therefore be mobilized as a priority to decarbonize heavy industry.

Only the combination of the three types of levers available – continuous progress, disruptive technologies and sobriety – will ensure a transformation that meets national decarbonization objectives.

Issue Editors :

Michel Pascal and Hervé Le Treut

Ont contribué à ce numéro



D.R

Lucie ADÉLAÏDE est doctorante en épidémiologie et est pharmacienne. À Santé publique France, elle travaille sur des problématiques de santé environnementale, et plus spécifiquement sur les effets combinés de la température, de l'environnement urbain et des inégalités sociales sur la santé périnatale.



D.R

Hugues AYPHASSORHO a été chargé d'études au CIRAD – Forêt de Kourou en Guyane française au début des années 1980, avant d'être en charge des équipements publics ruraux à la direction départementale de l'Agriculture et de la Forêt du Loir-et-Cher. Puis, il a dirigé jusqu'en 1995 l'unité de recherche Qualité des eaux, pêche et pisciculture du Cemagref de Bordeaux-Cestas. Par la suite, il a été, de 1985 à 1999, directeur adjoint et chef de service de l'Eau et des milieux aquatiques à la direction régionale de l'Environnement Aquitaine. De 1999 à 2002, il a dirigé l'Agence interdépartementale de l'Office national des forêts de Dordogne, Gironde et Lot-et-Garonne, puis la DIREN Aquitaine de 2002 à 2005. De 2005 à 2013, il a été directeur régional du centre IRSTEA de Bordeaux pour l'Aquitaine, régions Midi-Pyrénées et Poitou-Charentes. Il est aujourd'hui membre permanent du Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD), de la mission d'inspection générale territoriale (MIGT) de Bordeaux et est président de la mission régionale de l'autorité environnementale de Nouvelle-Aquitaine. Il a codirigé la mission CGEDD-CGAAER sur le changement climatique, l'eau et l'agriculture, dont le rapport a été publié en 2020.



D.R

Patrick BAZIN, forestier de formation et ingénieur des Ponts, des Eaux et des Forêts, a consacré le début de sa carrière à la réalisation de diverses missions au service de la protection de la nature (portant notamment sur les zones humides et les habitats d'intérêt communautaire) et de l'administration agricole. Il les a exercées au sein de l'État, en administration centrale et en services déconcentrés, au sein de bureaux d'études ou d'associations.

Il a intégré le Conservatoire du littoral en 2005, où il dirige actuellement la direction de la Gestion patrimoniale et est en charge du pilotage de la mission de propriétaire de l'établissement, dont le domaine couvre 200 000 ha représentant 750 sites en métropole et Outre-mer, soit environ 15 % du linéaire côtier français.

Depuis une dizaine d'années, les enjeux liés à l'interface terre-mer et aux conséquences du changement climatique occupent une place grandissante dans les activités de ce service.



D.R

Nathalie BERTRAND justifie de plus de 25 années d'expérience en recherche appliquée au CEMAGREF/IRSTEA, en tant qu'économiste et ingénieure des Ponts, des Eaux et des Forêts, travaillant sur les interactions villes-campagnes, la régulation de la consommation des sols agricoles et naturels et la préservation des écosystèmes. Elle a été impliquée dans et a coordonné des projets de recherche portant sur le développement des territoires et les enjeux sociétaux liés aux aménités environnementales. Il s'agit de projets pluridisciplinaires européens (FP5, FP6, Interreg-Alpine space), nationaux et régionaux. Ce parcours académique et d'appui à la décision publique lui a permis d'inscrire ses compétences dans différents cercles (EFESE, réseaux PEER, ESPON...). Jusqu'à la fin 2017, elle a été directrice adjointe scientifique du département Territoires d'Irstea et a eu en charge, entre 2011 et 2017, les évaluations AERES et HCERES d'un collectif de 60 chercheurs et ingénieurs en sciences humaines et sociales. Elle a été referee de différentes revues académiques (Économie rurale, Revue d'économie régionale et urbaine, Gestion Économie, Société, etc.). Elle a intégré en 2019 le Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD) et l'Autorité environnementale en tant que membre permanent. Elle a été corédactrice du rapport CGEDD/CGAAER « Changement climatique, eau et agriculture » (2020). Elle est aujourd'hui engagée au sein du CGEDD dans une mission portant sur les projets territoriaux de gestion de l'eau.

Lisa BOSTVIRONNOIS a, après l'obtention d'une licence en science politique à l'Université de Lille, intégré Sciences Po Paris pour y réaliser un master, se spécialisant dans les politiques environnementales. À la suite de son master, elle rejoint le ministère de la Transition écologique pour exercer au sein de l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC), dans le but d'aider ce point focal français dans le processus de revue et d'approbation des rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).



D.R

Éric BRUN, après avoir mené des recherches sur les interactions entre le manteau neigeux et les conditions météorologiques et climatiques, a dirigé le Centre d'études de la neige, puis le Centre national de recherches météorologiques (Météo-France et CNRS). Il s'est ensuite tourné vers les politiques publiques conduites dans le

domaine de l'adaptation au changement climatique au sein du ministère de la Transition écologique, tout en assurant le rôle de point focal du GIEC pour le gouvernement français.



D.R

Alain BURTIN est directeur des programmes Management d'énergie à EDF R&D. Il est diplômé de l'École nationale des Ponts et Chaussées et possède un DEA en intelligence artificielle. Il a rejoint la R&D de EDF en 2007, après un parcours l'ayant conduit à réaliser des études économiques générales, à la direction internationale, au pôle Industrie et à la direction Optimisation

trading. Dans le cadre du développement du groupe EDF et en tant que consultant pour des sociétés d'électricité étrangères, il a acquis une large expérience des systèmes et des marchés électriques en France, en Europe et à l'international.

L'ambition du programme Management d'énergie est d'accompagner le groupe EDF dans le contexte de transformation des systèmes énergétiques et des marchés électriques. Cette ambition se décline en deux actions concrètes : anticiper les évolutions et éclairer les enjeux ; et fournir les méthodes et les outils nécessaires pour y parvenir. Le programme réalise des études et des analyses technico-économiques des systèmes énergétiques du futur, développe les méthodes et les outils d'aide à la décision nécessaires à la valorisation d'un portefeuille d'actifs allant de l'investissement jusqu'à la gestion à court terme, contribue à la maîtrise des impacts du changement climatique sur les activités du groupe, et renforce la capacité de gérer l'exposition de l'équilibre offre-demande aux aléas au travers d'outils avancés de prévision de la production EnR à différentes mailles.

Marie CARREGA est diplômée de l'Institut national polytechnique de Grenoble et de l'Université du Texas à Austin. Marie Carrega, qui est ingénieure environnement de formation, est l'adjointe du Secrétaire général de l'ONERC, un organisme rattaché au ministère de la Transition écologique. Elle est plus particulièrement en charge du plan national d'adaptation au changement climatique.



D.R

Olivier CHANEL est directeur de recherche CNRS à Aix-Marseille School of Economics (AMSE). Il s'intéresse principalement à l'économie de la santé et de l'environnement, et a codirigé un ouvrage sur l'environnement. Depuis 1996, il a contribué à plusieurs rapports nationaux et internationaux sur l'évaluation économique des effets environnementaux, a agi en tant qu'expert pour OMS-Europe, l'Agence européenne pour l'environnement, le GIEC et divers instituts de santé français. Il a également été membre du conseil scientifique de l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (devenue ANSES).



D.R

Denis COUVET est professeur au Muséum, président de la FRB (Fondation de recherche pour la biodiversité) et associé à Sciences Po Paris et à l'Université de Lausanne. Il a été chercheur au CNRS et professeur associé à l'École polytechnique. Ingénieur agronome, Docteur et HDR en écologie-sciences de l'évolution, ses travaux ont porté

dans un premier temps sur l'évolution des systèmes de reproduction, la dynamique des espèces menacées et les réponses des communautés d'oiseaux communs aux changements globaux, avant d'être consacrés plus récemment aux sciences participatives en biodiversité et à la construction d'indicateurs, et aux relations biodiversité-sociétés, notamment à travers l'économie et l'agriculture, et le concept de nature.



© Ville de Nantes

Ronan DANTEC est sénateur de Loire-Atlantique depuis 2011. Il est vice-président de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable du Sénat et préside le groupe de travail « Enjeux internationaux Environnement-Climat-Développement ». Il préside également la commission spécialisée du Conseil national de la transition écologique (CNTE) chargée

de l'orientation et de l'action de l'ONERC. Engagé en faveur de la lutte contre le changement climatique, son action vise à établir un cadre cohérent des niveaux d'intervention locaux, nationaux et internationaux sur les questions climatiques. Conseiller municipal de Nantes, il est également porte-parole Climat du Conseil des communes et régions d'Europe (CCRE) et président fondateur de l'association Climate chance.



D.R

Vivian DÉPOUES est chef de projet Adaptation au changement climatique à I4CE – Institut de l'économie pour le climat. Ses travaux portent sur les démarches des acteurs territoriaux pour s'adapter pro-activement aux changements climatiques et accroître leur résilience. Il travaille pour ce faire à la fois avec les collectivités locales, les entreprises de services essen-

tiels et les institutions financières publiques. Il est titulaire d'un doctorat de l'Université Paris-Saclay, d'un master en sciences de l'environnement de l'Université Pierre et Marie Curie et d'un master en politiques environnementales de Sciences Po Paris. Il a réalisé sa thèse en partenariat avec l'Ademe, I4CE et la SNCF sur l'adaptation du système ferroviaire français, analysant la manière dont les grandes organisations s'approprient les connaissances scientifiques et se transforment face aux évolutions des conditions climatiques. Il intervient également dans le cadre de différents enseignements.



© Jean-Marie DUFOUR

Jérôme DUVERNOY, qui est ingénieur de l'École nationale de la météorologie et Docteur de Télécom Paris, est chargé de mission Adaptation au changement climatique au ministère de la Transition écologique. Après avoir travaillé à Météo-France dans le domaine instrumental, il a rejoint l'ONERC en 2012. Créé par la loi du 19 février 2001, l'ONERC a pour missions de collecter et de diffuser les informations sur les risques liés au réchauffement climatique, de formuler des recommandations sur les mesures d'adaptation à envisager pour limiter les impacts du changement climatique et d'être le point focal du GIEC.



D.R

Maxime EFOUI-HESS est coordinateur de projet au sein de The Shift Project, qui œuvre en faveur d'une économie post-carbone. Ingénieur et chercheur de formation, il est en charge des travaux de ce *Think Tank* portant sur les thématiques industrielles et numériques. Les travaux portant sur le secteur de l'industrie sont copilotés par Éric Bergé, chef de projet Industrie lourde pour The Shift Project.

La mission de The Shift Project, qui est une association loi 1901 reconnue d'intérêt général et guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, est d'éclairer et d'influencer le débat portant sur la transition énergétique en Europe. Ses membres sont de grandes entreprises qui veulent faire de la transition énergétique leur priorité. Ses activités consistent à élaborer et publier des rapports et outils qui permettent aux acteurs de se saisir des sujets de transition énergétique-carbone sur la base de données concrètes et transparentes, cette base de données est en accès libre. Elles sont portées par The Shift Project dans le cadre du débat public.



D.R

Hervé LE TREUT a étudié la physique à l'École normale supérieure, et s'est orienté très tôt vers l'étude du système climatique. Après une longue carrière au CNRS, il exerce aujourd'hui en qualité de professeur à Sorbonne Université et à l'École polytechnique. Ancien directeur du Laboratoire de météorologie dynamique, puis, pendant 11 ans, de l'Institut Pierre Simon Laplace,

il a également été membre de l'Académie des sciences, de l'Académie d'agriculture et de l'Academia Europaea. Il a participé à l'élaboration de cinq rapports du GIEC, a été membre du comité scientifique joint du programme mondial de recherche sur le climat et a fait partie du comité de suivi de la COP21. La plus grande partie de son travail a été consacrée au développement des modèles climatiques planétaires et à leur usage pour définir les transitions environnementales. Mais ces dernières années, il s'est surtout consacré à la dimension régionale des changements climatiques au travers du projet Acclimater, en région Nouvelle-Aquitaine.



Ademe

Solange MARTIN est Docteure en sociologie des sciences et des techniques, économiste et diplômée de Sciences Po Paris. Elle a débuté sa carrière comme chercheur dans le cadre de plusieurs projets européens visant à élaborer une méthodologie d'évaluation et de suivi des innovations dans le domaine des transports. Elle rejoint l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) en 2006. Elle y a été en charge du pilotage de différents projets en sciences humaines et sociales : sondages d'opinion, projets et programmes de recherche, études prospectives et formation professionnelle. Elle rejoint en début d'année 2020 le Secrétariat du Haut Conseil pour le climat (HCC). Son domaine d'expertise concerne les dimensions humaines et sociales de la transition climatique et l'évaluation des politiques publiques en la matière.



D.R

François MITTEAULT a effectué une grande partie de sa carrière (de 1983 à 2010) au Centre national pour l'aménagement des structures des exploitations agricoles (CNASEA), qui est devenu, en 2009, l'Agence de services et de paiement (ASP). Il a notamment en charge les questions d'installation en agriculture, les mesures agro-environnementales, le programme Leader et le développement territorial. Il y a été nommé directeur du développement rural en 2005. Après des séjours à la Réunion (agriculteurs en difficulté), puis en Nouvelle-Calédonie (réforme foncière), il est nommé conseiller technique en 2001 au cabinet du ministre de l'Agriculture, Jean Glavany. En 2010, il est chargé de préfigurer l'établissement public du Marais poitevin (EPMP), qu'il dirigera jusqu'en 2014. Il est ensuite nommé directeur général adjoint à la région Poitou-Charentes en charge de l'agriculture, de l'environnement, de l'eau, de la biodiversité et des énergies renouvelables. En 2015 (et jusqu'en 2018), il intègre le ministère de l'Environnement, en tant que directeur de l'Eau et de la biodiversité. Nommé inspecteur général de l'administration du développement durable (IGADD) en 2018, il est alors nommé membre de la mission régionale d'autorité environnementale de Normandie. Depuis la fin de sa carrière professionnelle en 2020, il préside le comité d'orientation Recherche et prospective de la fédération des parcs naturels régionaux de France. Il a été corédacteur du rapport CGEDD/CGAAER « Changement climatique, eau et agriculture » (2020).



D.R

Laurent MONTADOR justifie de plus de 25 ans d'expérience dans l'industrie de l'assurance et de la réassurance en France et à l'international. Il exerce les fonctions de directeur général adjoint de la Caisse centrale de réassurance (CCR) depuis 2014 et de directeur général délégué de CCR Re depuis 2016. Membre actif de

diverses organisations professionnelles, il est également administrateur du GAREAT (attentats, terrorisme) et du GAREX (risques exceptionnels). Diplômé de l'Institut de statistique de l'Université de Paris et de Paris Dauphine, il dispense de nombreux cours et participe à des conférences sur les thèmes liés aux risques et aux conditions d'assurabilité. Il est aussi membre du comité scientifique BRGM (recherche et innovations) et du OECD High Level Advisory Board on the financial management of catastrophic risks. Il contribue également à la rédaction d'articles dans des revues professionnelles.



D.R

Samuel MORIN est chercheur à Météo-France. Il est depuis 2021 directeur du Centre national de recherches météorologiques (Météo-France – CNRS), qui rassemble l'essentiel des activités de recherche de Météo-France dans le domaine de la météorologie et du climat. Après une thèse en sciences de l'environnement (2008), il a exercé au Centre d'études de la neige (équipe du CNRM basée à Grenoble), qu'il a dirigé de 2015 à 2020. Médaille de bronze du CNRS en 2017, il a coordonné ou participé à plusieurs projets de recherche aux niveaux national et européen dans le domaine de l'étude du manteau neigeux de montagne, s'inscrivant dans un cadre interdisciplinaire pour répondre à des problématiques multiples (risque d'avalanches, enjeux hydrologiques, tourisme de montagne), de courte échéance (prévision en temps réel), et se rattachant à la projection climatique. Il est l'auteur principal du rapport spécial « Océan et Cryosphère » du GIEC rendu public en 2019 et auteur contributeur du dernier rapport du GT2 du GIEC approuvé en février 2022.



D.R

Morgane NICOL est directrice du programme Territoires à I4CE (Institut de l'économie pour le climat). Elle assure le développement, le suivi et la diffusion des activités de cet Institut à destination des acteurs territoriaux, en particulier des collectivités locales. Morgane Nicol était jusqu'en juin 2018, cheffe de projet Finance Climat au sein du *Think Tank* qu'est l'I4CE. Avant de rejoindre I4CE, elle a travaillé comme cheffe de projet Énergie-Climat à l'agence AFD (Agence française du développement) d'Istanbul, puis comme chargée d'affaires Fonds propres et participations chez Proparco. Elle a ensuite travaillé pour Carbone 4, un cabinet de conseil spécialisé dans la stratégie Carbone, tout d'abord comme consultante senior, puis comme manager. Elle est diplômée d'un master en management et d'un MSc en finance de l'EDHEC.

Sylvie PAREY est ingénieur-chercheur-sénior à EDF/R&D et est titulaire d'une habilitation à diriger des recherches. Elle a débuté sa carrière à EDF/R&D en 1989, pour contribuer dès 1990 au premier projet de recherche EDF sur le changement climatique, en collaboration avec l'équipe d'Hervé Le Treut au Laboratoire de météorologie dynamique. Elle a contribué à plusieurs projets européens sur le changement climatique, avec des résultats cités dans le



D.R

deuxième rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC). À la suite des tempêtes de 1999, elle pilote un projet EDF/R&D sur les aléas climatiques et météorologiques, puis, à la suite de la canicule de 2003, elle initie et pilote le premier projet d'analyse des impacts du changement climatique sur les activités d'EDF. Depuis 2006, elle s'est orientée vers l'expertise et est ingénieur-chercheur-sénior depuis 2009. Elle est l'auteur de plusieurs publications parues dans des journaux à comité de lecture et intervient régulièrement dans des conférences scientifiques. Elle fait partie des relecteurs au niveau français des résumés pour décideurs du 6^e rapport du GIEC en cours de finalisation.



D.R

d'adaptation et d'atténuation du changement climatique favorables à la santé.

Mathilde PASCAL est épidémiologiste à la direction Santé environnement – Travail de Santé publique France. Elle s'intéresse depuis 2004 aux impacts sur la santé de la pollution de l'air, de la météorologie et du changement climatique, en développant des outils pour mieux connaître les risques et leurs déterminants et pour promouvoir des politiques



D.R

Michel PASCAL est ingénieur général des Mines, diplômé de l'École polytechnique, de l'École supérieure de métrologie et de l'École nationale des télécommunications.

Il est membre permanent du Conseil général de l'économie (ministère de l'Économie, des Finances et de la Relance) et du Conseil général de l'environnement et du développement durable et de l'Autorité environnementale (ministère de la Transition écologique).

Il a dirigé pendant six ans l'Agence nationale pour la garantie des droits des mineurs, laquelle est chargée de verser aux anciens mineurs des prestations sociales en compensation de la fermeture des mines en France. Il a coordonné la rédaction du premier livre sur l'histoire de la mine en France, du début de l'ère industrielle jusqu'aux opérations de conversion et de fermeture. Il a beaucoup œuvré pour montrer combien l'exemple de la transition énergétique (abandon de la production de charbon) et son accompagnement social pourraient servir de repères pour les transitions que nous vivons actuellement.

Il a créé la direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement du Nord-Pas-de-Calais, qu'il a dirigée pendant cinq ans. Il s'est beaucoup impliqué dans la déclinaison locale du Grenelle de l'environnement et a créé l'Observatoire du changement climatique dans le Nord-Pas-de-Calais.

Il a auparavant occupé des fonctions de directeur régional de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement, ainsi que de directeur régional de l'Environnement, dans plu-

sieurs régions. Il est le coauteur en 2003 d'un rapport sur « les DRIRE et l'effet de serre ».

Il est officier dans l'Ordre national du mérite.



D.R

Dominique ROLLIN justifie de 40 années d'expérience dans les systèmes de culture et de production. Il s'est intéressé à la gestion intégrée des ressources en eau dans les pays tropicaux (et en Europe), en particulier dans les pays en voie de développement (Afrique du Sud, Madagascar, Rwanda...), au travers de projets de Recherche & Développement interdisciplinaires. Une grande

partie de cette expérience a été acquise au ministère de la Coopération, puis au CIRAD et à l'IWMI (International Water Management Institute). Il a participé à plusieurs projets interdisciplinaires de Recherche & Développement relatifs à la diffusion des innovations, aux systèmes de gestion et aux instruments économiques, institutionnels et politiques. À l'IWMI (2004-2006), il a contribué à plusieurs projets de recherche s'inscrivant dans le cadre du challenge Programme « Eau et alimentation ». Il a été directeur adjoint chargé de la coordination de projets de recherche de l'UMR G-EAU à Montpellier. De 2009 à 2013, à IRSTEA, il a animé un thème de recherche sur la gestion de l'eau, des usages, des services et de leurs impacts. Il a assuré de 2012 à 2019, le Secrétariat général de l'AFEID (Association française pour l'eau, l'irrigation et le drainage). Il a été membre du Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER) de 2018 à 2020. Il a été corédacteur du rapport CGEDD/CGAAER « Changement climatique, eau et agriculture » (2020).



D.R

David SALAS Y MÉLIA est chercheur climatologue. Il est le responsable du Groupe de météorologie de grande échelle et climat du CNRM (Météo-France – CNRS). Cette structure a pour principales missions de mieux comprendre les mécanismes et les impacts du changement climatique, d'étudier la qualité de l'air, d'élaborer un système de prévision saisonnière du climat et de produire régulièrement des simulations du climat

en soutien des rapports du GIEC. Codirecteur de l'Infrastructure nationale de recherche de modélisation CLIM-France et correspondant actuel des groupes de modélisation climatique français au sein du programme mondial de recherche sur le climat, il est également co-animateur du RECO, l'organisme à la frontière science-décision sur les changements climatiques en Occitanie. En tant que chercheur, il s'emploie principalement à mieux comprendre et à estimer les évolutions passées et futures du climat à travers l'utilisation de modèles. Il s'intéresse plus particulièrement au rôle et à l'évolution des glaces marines au sein du système climatique. À ce titre, il a notamment créé et développé un modèle représentant l'évolution de la banquise antarctique et arctique.



D.R

Michel SALLENAVE a débuté sa carrière en tant que volontaire à l'aide technique (VAT) en Nouvelle-Calédonie, exerçant dans le service du Génie rural à Nouméa, de 1982 à 1984. Revenu en métropole, il a pris la responsabilité du service Hydraulique, forêt, chasse et pêche à la direction départementale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt de la Marne jusqu'en 1987, puis il a été l'adjoint du chef du SRAE (Service régional d'aménagement des eaux) à la DRAF Languedoc-Roussillon, de 1987 à 1990. Il est ensuite nommé adjoint du directeur régional de l'environnement – chef du service de l'Eau et des milieux aquatiques à la DIREN Languedoc-Roussillon (1991-1996), puis directeur régional à la DIREN de Guyane (1996-1999). Au ministère de l'Agriculture et de la Pêche – DGA, de 1999 à 2002, il est sous-directeur de la modernisation et des services. Il devient directeur départemental de l'agriculture et de la forêt à la DDAF de l'Hérault (34) de 2002 à 2006, puis Secrétaire général adjoint et chef de la subdivision administrative des îles Australes – Haut-commissariat de la République en Polynésie française (2006-2009). Il occupe ensuite le poste de directeur régional de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt de Midi-Pyrénées de 2009 à 2013. En 2013, il est nommé commissaire délégué de la République pour la province nord en Nouvelle-Calédonie, poste qu'il occupe jusqu'en 2018. En mai 2018, il intègre le Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER) en tant que membre, assurant la présidence du groupe Eau. Il a codirigé la mission CGEDD-CGAAER sur le changement climatique, l'eau et l'agriculture, dont le rapport a été publié en 2020. Michel Sallenave a pris sa retraite en décembre 2020.



D.R

Denis SALLES est directeur de recherche en sociologie à l'INRAE, au sein de l'unité ETTIS du centre de Nouvelle-Aquitaine Bordeaux. Il dirige des recherches en sociologie de l'environnement et de l'action publique portant sur l'adaptation et l'anticipation des sociétés face au changement climatique, sur les modes de gouvernance de l'eau, sur la concertation et sur les dispositifs de sciences participatives.



D.R

Virginie SCHWARZ est la présidente-directrice générale de Météo-France depuis septembre 2019.

Ingénieure générale des Mines, spécialiste des politiques publiques dans les domaines de l'énergie et de l'environnement, en particulier du changement climatique, elle était précédemment directrice de l'Énergie au ministère de la Transition écolo-

gique et solidaire, en charge des politiques publiques dans le domaine de l'énergie (sécurité d'approvisionnement, développement de la transition énergétique et des éner-

gies renouvelables, tutelle des entreprises publiques du secteur, questions tarifaires, lutte contre la précarité énergétique, coopérations internationales et questions européennes). À ce titre, elle a été particulièrement engagée dans l'élaboration de la nouvelle stratégie française pour l'énergie et le climat au travers de la programmation pluriannuelle de l'énergie.

Elle avait auparavant occupé différentes fonctions, dont celle de directrice générale déléguée, à l'Ademe, l'opérateur de l'État œuvrant en faveur de la transition énergétique et écologique, et a travaillé à New York dans le cadre du programme des Nations unies pour le développement (PNUD), comme conseiller sur l'atténuation du changement climatique auprès du directeur chargé du Fonds mondial pour l'environnement.

Avant de rejoindre l'Ademe, elle avait notamment piloté la sous-direction de l'Électricité à la DGEMP (ministère de l'Industrie), où elle était chargée en particulier des tarifs de l'électricité, de la mise en place de l'ouverture à la concurrence du secteur électrique et du soutien aux énergies renouvelables électriques.



D.R

Hélène SOUBELET est docteur vétérinaire, titulaire d'un DEA en pathologie végétale et directrice générale de la Fondation pour la recherche sur la biodiversité depuis 2017. S'appuyant sur ses précédentes fonctions, d'abord au ministère chargé de l'Agriculture, puis au ministère chargé de l'Écologie, son expertise porte sur la santé publique vétérinaire, la gestion des crises sanitaires

et l'évaluation des politiques publiques en la matière. À la FRB, elle a développé une approche systémique des impacts des activités humaines sur la biodiversité et des solutions permettant de les éviter ou de les réduire, intervenant tant dans le cadre des grands processus internationaux, qu'au niveau des États, des entreprises ou des citoyens.



D.R

Jean-Michel SOUBEYROUX est directeur adjoint scientifique de la direction de la Climatologie et des services climatiques de Météo-France depuis 2015.

Ingénieur en chef des Ponts, des Eaux et des Forêts, il est en charge du transfert vers les opérationnels des résultats de la recherche sur le climat et a participé à de nombreux projets sur les événements extrêmes

et le changement climatique en France (pluies extrêmes, sécheresse et ressource en eau, vagues de chaleur, tempêtes, neige en montagne). Il contribue au développement des services climatiques aux niveaux national (DRIAS, Climat HD) et européen (Copernicus C3S).

Il a récemment coordonné la production du rapport DRIAS-2020 qui documente le nouveau jeu de projections climatiques de référence produit par Météo-France et contribue à porter la parole de cet établissement sur le climat auprès des médias et à le représenter auprès des organismes scientifiques et institutionnels.

Spécialiste des questions d'adaptation au changement climatique, il est notamment membre associé de la mission régionale de l'autorité environnementale Occitanie depuis 2016 et participe aux travaux des réseaux régionaux d'expertise sur le changement climatique de plusieurs régions.



D.R

Jean-Michel VALANTIN est Docteur en études stratégiques. Il est spécialiste des effets géopolitiques et stratégiques du changement climatique et de la compétition internationale pour les ressources. Il a écrit près d'une centaine d'articles sur le sujet et est responsable de la section Environment and security du *Think Tank The Red (Team) Analysis Society*.

Passé par plusieurs cabinets ministériels, il a acquis une longue expérience professionnelle nationale et internationale dans le champ du développement durable. Il se spécialise actuellement dans le domaine de la mobilisation de l'intelligence artificielle pour faire face aux défis de l'urbanisation, de la gestion des ressources et de l'adaptation au changement climatique.

Il est l'auteur de plusieurs ouvrages, dont « Hollywood, Washington et le Pentagone » (Autrement, 2003), « Écologie et gouvernance mondiale » (Autrement, 2007), « Guerre et nature. L'Amérique se prépare à la guerre du climat » (Prisma Media, 2013), « Géopolitique d'une planète dérégulée » (Seuil, 2017) et « L'aigle, le dragon et la crise planétaire » (Seuil, 2020).



© J.F. DARS

Vincent VIGUÏÉ est chercheur au CIRED (École des Ponts Paris-Tech), qu'il a rejoint en 2008 après avoir travaillé à la Banque mondiale. Il est Docteur en économie et est agrégé de physique. Il travaille sur les politiques de développement urbain durable, notamment sur le lien entre aménagement et politiques d'adaptation au changement climatique, ainsi que sur les politiques de

limitation de l'étalement urbain et leurs conséquences. Il est l'auteur d'une trentaine de publications sur ces sujets parues dans des revues internationales et a participé à de nombreux travaux d'expertise, aussi bien auprès d'institutions publiques que privées. Il enseigne régulièrement dans plusieurs établissements d'enseignement supérieur et est notamment chargé de cours à l'École des Ponts ParisTech et à Sciences Po Paris.



D.R

Sarah VOIRIN est chargée de mission à l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC). Au sein de cet observatoire, Sarah Voirin est en charge de la coordination interministérielle sur l'adaptation et des politiques publiques en lien avec la biodiversité.

Depuis cinq ans, elle participe à la coordination de la politique

nationale d'adaptation au changement climatique. Elle a également contribué à l'élaboration et à la mise en œuvre du deuxième plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC-2) et participe aujourd'hui à son évaluation et à la préparation du troisième plan, dans le cadre de la stratégie française Énergie Climat.

Depuis 2020, elle est impliquée dans le projet LIFE Intégrée ARTISAN, qui vise à déployer à toutes les échelles des solutions d'adaptation au changement climatique fondées sur la nature.

Sarah Voirin est diplômée de Sciences Po Grenoble, d'AgroParistech et de l'Université Paris-Saclay et justifie d'une formation en sciences politiques, relations internationales, politiques environnementales et communication sur le changement climatique.